ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE GRIGNON
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL

ANNALES AGRONOMIQUES

VOLUME 18
1967

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS 7e

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 18 1967 NUMÉRO 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS-7e

Ann. agron., 1967, **18** (1), 5-15.

EXPÉRIENCES SUR L'INFILTRATION DE L'EAU NON SATURANTE DANS UN SOL PRÉALABLEMENT HUMIDE. (1)

A. FÉODOROFF et B. YARON (2)

avec la collaboration technique de J.-P. TOURNIER

Laboratoire des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles

SOMMAIRE

Les essais étaient destinés à vérifier si l'infiltration dans un sol humide correspond à un modèle d'infiltration préférentielle.

Ils ont montré qu'il s'agit au contraire, dans les conditions expérimentales considérées, d'un processus de déplacement progressif de la plus grande part de l'eau préexistante.

INTRODUCTION

On a toutes les raisons de penser que les modalités de l'infiltration sont affectées par la présence préalable de l'eau dans le sol. En effet, suivant l'image qu'on se fait généralement du sol, on peut penser que certains pores, probablement les plus fins, étant déjà remplis d'eau, ne jouent qu'un rôle passif et que l'eau d'apport ultérieur contourne ces zones en empruntant des chemins préférentiels. Cependant, il semble difficile d'exclure la possibilité de contacts entre ces deux « eaux », et de ne pas songer à un certain remplacement, partiel peut-être, de l'eau préexistante.

Nous avons donc cherché à entreprendre l'analyse expérimentale de ce phénomène, en arrosant avec de l'eau « marquée » un sol préalablement humide, et en déterminant immédiatement après la fin de l'arrosage les positions respectives de l'eau préexistante et de l'eau d'apport.

(1) Étude partiellement financée par une convention D. G. R. S. T.
(2) Adresse : *The Volcani Institue of Agricultural Research, Rehovot, Israel.*

Les essais ont été conduits sur une terre cuite, matériau plus maniable qu'un sol naturel, et possédant une porosité plus différenciée qu'un sable.

Dans une première partie, nous décrivons une méthode d'obtention de profils hydriques initiaux uniformes et non saturés. Nous donnons ensuite la méthode et les résultats des essais d'infiltration.

I. — OBTENTION DE PROFILS HYDRIQUES INITIAUX NON SATURÉS ET UNIFORMES

Introduction

L'obtention de colonnes de sol à profil hydrique uniforme et non saturé constitue une difficulté pour les expériences dans les domaines de la physique et de la chimie du sol.

Un premier procédé possible consiste à introduire de la terre sèche puis à l'humecter, mais le profil hydrique n'est pas uniforme. Récemment YARON et coll. (1966) et SHALHEVET et YARON (1966) utilisèrent un séchage ultérieur par courant d'air, mais ceci implique une installation complexe, difficilement réalisable dans tout laboratoire.

Un autre procédé parfois utilisé consiste à introduire dans le tube une terre préalablement humectée. Employé avec succès pour des agrégats calibrés (BALLIF et coll., 1966), ce procédé est délicat avec de la terre fine car, aussi bien l'humectation initiale que le remplissage sont difficiles à réaliser d'une façon uniforme.

Nous avons donc mis au point une autre méthode qui consiste à introduire dans le tube une pâte saturée, puis en extraire la quantité d'eau voulue, en créant une dépression contrôlée à l'une des extrémités. L'utilisation de filtres très fins mais très perméables à l'eau, interposés entre le sol et le vide, a permis de travailler à des dépressions élevées. Ce dispositif n'est pas équivalent à un appareil de HAINES, car il se forme des ménisques sur la face inférieure du filtre au contact avec l'air. Cependant l'expérience montre que la quantité d'eau extraite varie avec la dépression appliquée, et qu'on obtient des profils hydriques uniformes à diverses teneurs en eau.

Dispositif expérimental et appareillage

Le dispositif est représenté sur la figure 1. Il comporte les éléments suivants :

1° Le tube en verre (1) contenant le sol. Longueur 30 cm. Diamètre intérieur 3 cm.

2° Le filtre poreux (3) et son support en verre (5). Le filtre poreux « Millipore », composé d'esters de cellulose, a une épaisseur inférieure à 1 mm. Le diamètre maximum des pores indiqué par le fabricant est 0,8 μ. Le filtre saturé supporte une pression supérieure à 1 kg/cm^2. Sa porosité totale est de 82 p. 100, ce qui assure une excellente perméabilité. Le support (5), dont la partie centrale (4) est constituée de verre fritté, assure le maintien du filtre qui est très friable. Une rondelle en caoutchouc (2) assure l'étanchéité entre le tube et le filtre. Une pince (6) maintient l'ensemble solidaire.

3° Une enceinte en tube plastique transparent (7) dans laquelle est exercée la dépression. Cette enceinte reçoit le support-filtre. L'eau provenant de la colonne de sol s'écoule dans une burette graduée (8) munie d'un système de vidange (9).

4° Une trompe à eau donnant une dépression assez stable de — 950 g/cm^2.

5° Un régulateur de dépression à mercure (10). La dépression requise est donnée par la dénivellation H. Lorsqu'elle est dépassée, de l'air entre par le tube (11), et la pression au-dessus du mercure remonte. Le contrôle par un manomètre Bourdon (12) a montré que la dépression ainsi réglée ne variait que de $\pm$ 5 g/cm^2.

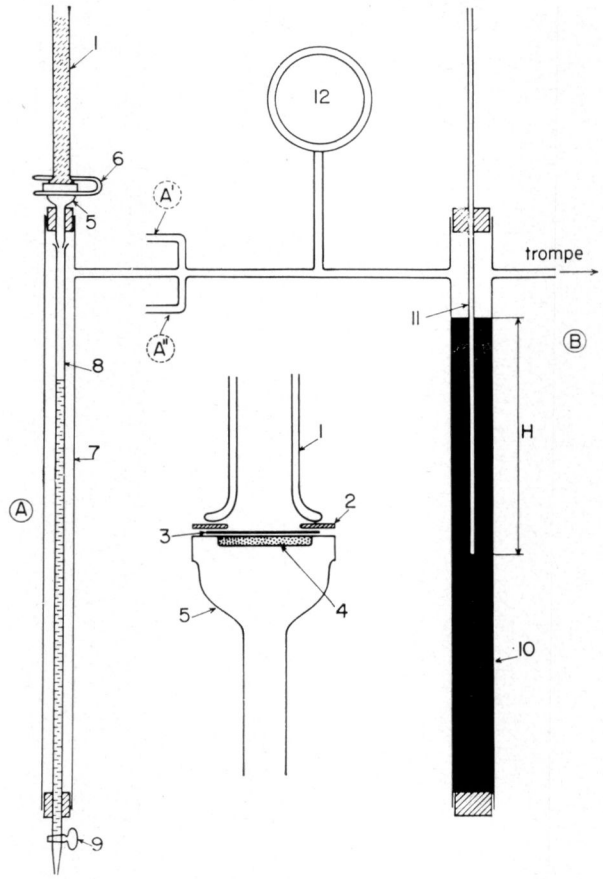


FIG. 1. — *Dispositif expérimental* (cf. texte)

Le sol utilisé est l'horizon B de Versailles, tamisé à 0,5 mm et chauffé à 600°. Certaines propriétés de ce matériau ont été décrites par BETREMIEUX et coll. (1960). Il contient 4 p. 100 d'éléments < 2 μ, 20 p. 100 de 2-20 μ, 43 p. 100 de 20-50 μ, 16,5 p. 100 de 50 à 200 μ et 16,5 p. 100 de 0,2 à 0,5 mm. Sa densité réelle sèche, déterminée par le pycnomètre différentiel à air Beckman, est 2,77 g/cc. Sa *rétention normale* (1) (fig. 2), estimée d'après notre méthode de laboratoire (FEODOROFF-BETREMIEUX, 1964), se situe à 16-17 p. 100 de terre sèche. En outre, la relation pression-teneur en eau a été obtenue à l'aide de l'extracteur volumétrique « Soilmoisture » (fig. 3).

MODE OPÉRATOIRE

Le dispositif est monté comme l'indique la figure. D'un jet de pissette on humecte le filtre, puis on ajuste le régulateur à la dépression voulue, et on casse le vide.

On mélange le sol avec 50 p. 100 de son poids d'eau, ce qui donne une pâte fluide. Cette pâte

(1) La *rétention normale* est la plus forte teneur en eau pour laquelle la cession de cette dernière est faible Elle correspond généralement à la capacité au champ mesurée *in situ* quand le drainage est normal.

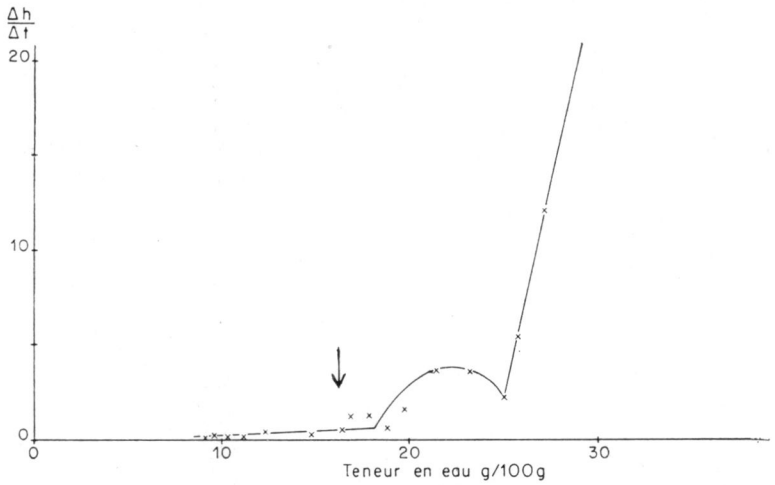


FIG. 2. — *Courbe de redistribution*
La flèche indique la rétention normale.

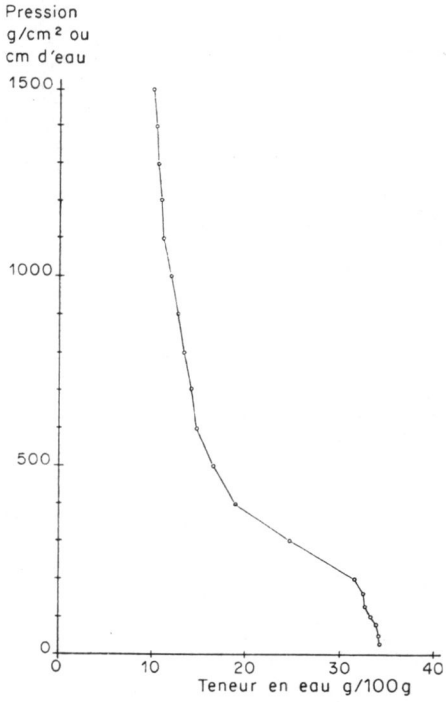


FIG. 3. — *Relation entre la pression et la teneur en eau*

est introduite dans le tube (1) à l'aide d'un entonnoir spécial, ayant une tige de 30 cm de long et 2,5 cm de diamètre. L'entonnoir, arrivant d'abord presque au contact du filtre, est relevé au fur et à mesure de l'écoulement de la pâte. Cette façon d'opérer a donné une densité apparente sèche de 1,28, et donc une porosité de 0,54 cc/cc.

Lorsque le remplissage est achevé, on met en œuvre la dépression, et on mesure la quantité d'eau écoulée en fonction du temps à l'aide de la burette graduée.

Les essais ont été réalisés avec deux dépressions : — 950 et — 440 g/cm². Chaque fois trois colonnes (assemblages A) ont été branchées sur la même source de vide.

Les profils hydriques ont été déterminés après prélèvement du sol dans les colonnes par tranches de 1 cm et séchage à l'étuve à 105°.

Résultats

L'écoulement, d'abord rapide, est allé en s'atténuant, pour cesser totalement au bout de 48 heures avec les deux dépressions. Les expériences ont été arrêtées un jour plus tard pour déterminer les profils hydriques.

La figure 4 représente deux profils, représentatifs de chaque dépression. On constate que les teneurs en eau sont assez faibles, ne dépassant pas 50 p. 100 de la saturation pour — 440 g/cm², et que leur répartition suivant la profondeur est uniforme.

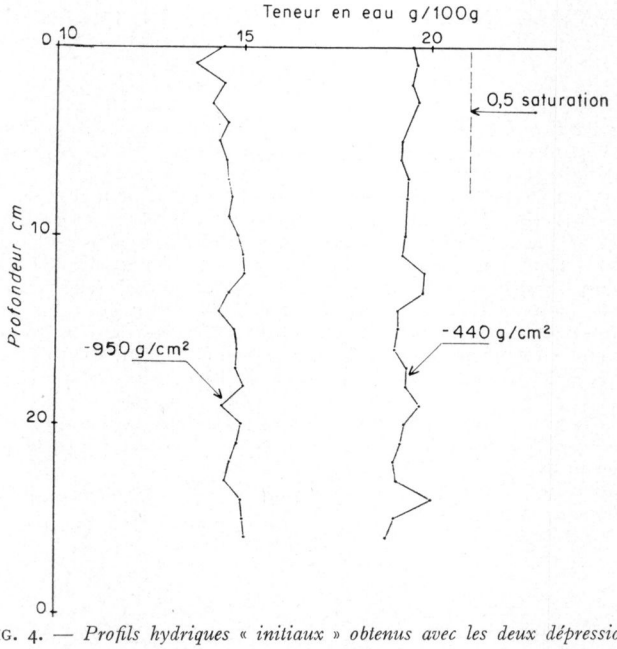


Fig. 4. — *Profils hydriques « initiaux » obtenus avec les deux dépressions*

La répétition des essais a permis de s'assurer qu'on obtient une reproductibilité très satisfaisante.

Il se trouve que la plus faible teneur en eau ainsi obtenue (dépression de — 950 g/cm²) se situe vers 15,0 p. 100 de terre sèche, soit à une valeur légèrement inférieure à la *rétention normale* de ce matériau. Cependant la succion correspondante de l'eau dans le sol, mesurée par pression avec l'extracteur à plaque, est plus faible.

TABLEAU

Valeur de la dépression et de la pression correspondant à la même teneur en eau

Teneur en eau moyenne (g/100 g)	Dépression nécessaire (— g/cm²)	Pression (extracteur) (g/cm²)	pF
15,0	950	600	2,78
19,6	440	400	2,60

Il semble donc que le procédé utilisé ne permette pas de transmettre intégralement à l'eau du sol la contrainte appliquée sous le filtre, par suite certainement de l'existence de ménisques à la partie inférieure de ce dernier.

II. — EXPÉRIENCES D'INFILTRATION EN TERRE HUMIDE

Méthode et technique

Les expériences ont consisté à apporter un arrosage sur les colonnes de sol à humidité uniforme L'eau apportée contenant un sel soluble ($CaCl_2$) en guise de traceur, il a été possible de déterminer après coup sa distribution dans la masse du sol.

Avant arrosage, un jeu de trois colonnes était soumis à la même dépression. L'équilibre étant atteint, on a déterminé le profil hydrique initial « témoin » sur l'une, et procédé à l'arrosage sur les deux autres. Sur les colonnes destinées à l'arrosage, on a prélevé dans la partie supérieure une couche de 1 cm de façon à contrôler que l'humidité initiale correspond bien à celle de la colonne « témoin ». L'extrémité inférieure de ces colonnes n'était pas bouchée, de façon à permettre à l'air de s'échapper.

Pour chaque humidité initiale, on a apporté deux doses, contrôlées par pesée de la colonne avant et après arrosage. Les deux applications étaient effectuées dans la même journée.

L'arrosage était réalisé au moyen d'un tube capillaire plongeant dans un récipient avec plan d'eau maintenu constant par un dispositif de Mariotte. L'intensité était voisine de 0,1 mm/mn, soit 6 mm/heure.

Pendant l'infiltration aucun déplacement de l'eau dans la colonne n'était visible à l'œil.

Immédiatement après arrosage la colonne était couchée, et la terre prélevée par tranches de 1 cm, en commençant par la partie inférieure.

Sur chaque prise on a déterminé l'humidité puis la teneur en chlore par la méthode potentiométrique de McInnes et Dole (1928).

Les essais ont été répétés à un intervalle d'une semaine.

Résultats et discussion

Les profils hydriques obtenus immédiatement après la fin de l'arrosage sont représentés sur la figure 5.

La partie hachurée correspond à l'eau d'arrosage, calculée d'après la teneur en Cl^- de chaque couche, en faisant l'hypothèse que, pendant la faible durée de l'expérience, la solution apportée ne s'appauvrit pas par diffusion physico-chimique au contact de l'eau pure préexistante (1).

(1) Pour le calcul, cf. A. Feodoroff, 1965. Dans le cas présent nous avons déduit le chlore existant initialement dans le matériau. La solution d'arrosage en contenait 200 méq./l.

Les faits suivants apparaissent au vu de ces résultats :

1° Dans tous les cas l'eau apportée est située dans la partie supérieure du profil. Elle a remplacé la plus grande part de l'eau préexistante.

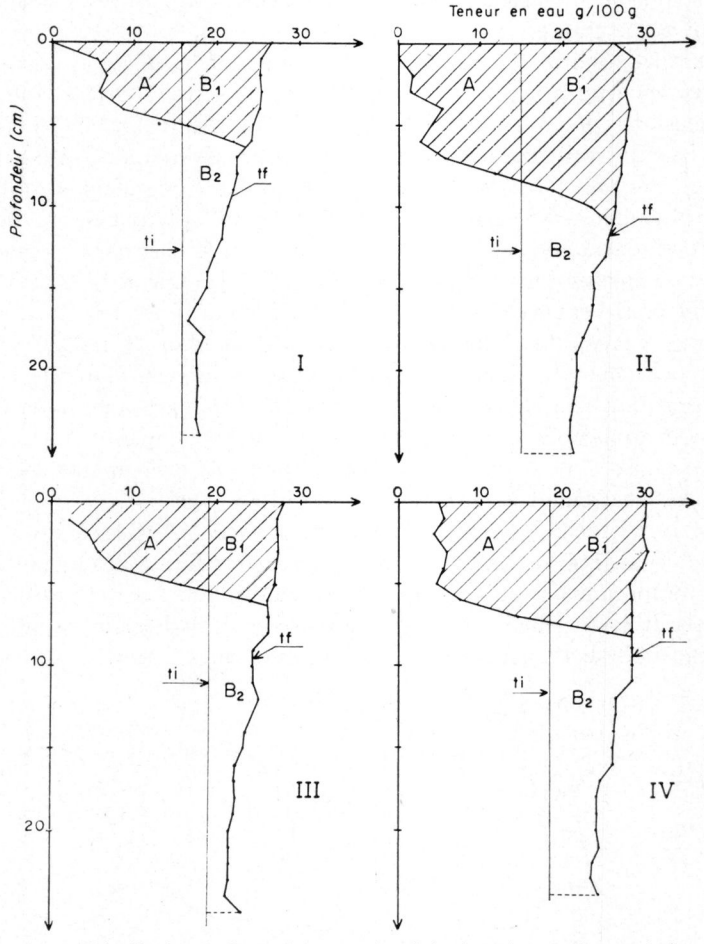


FIG. 5. — *Distribution de l'eau d'arrosage* (partie hachurée) *et de l'eau préexistante immédiatement après arrosage*

t_i = teneur en eau initiale
t_f = teneur en eau finale

Doses d'arrosage mm

I	15,5
II	29,7
III	17,3
IV	28,4

2° L'eau préexistante provenant des couches superficielles se retrouve dans la partie inférieure du profil. Le planimétrage confirme l'identité (aux erreurs expérimentales près) des aires A et B_2.

3° Dans la partie inférieure du profil on ne retrouve pas l'humidité initiale, mais une humidité plus élevée, et d'autant plus que la hauteur d'eau apportée est élevée. On note même parfois un léger excès au fond du tube.

4° Dans les couches supérieures, également, la teneur en eau totale dépend, pour une intensité donnée, de la hauteur d'eau apportée.

Avec la faible intensité d'arrosage utilisée ici (voisine des 5 à 10 mm/h employés en irrigation par aspersion) tout se passe comme si l'eau d'apport remplaçait progressivement l'eau préexistante, en la poussant devant elle.

Analysant les résultats d'expériences assez voisines des nôtres quant à l'objectif, mais réalisées selon un principe différent, HORTON et HAWKINS (1965) arrivent aux mêmes conclusions globales que nous, à savoir que l'eau d'infiltration ne circule pas par des chemins privilégiés situés dans les gros pores remplis initialement d'air, mais déplace l'eau préexistante. L'interprétation qu'ils en donnent se résume ainsi : les pores les plus fins sont initialement saturés : l'eau d'apport pénètre dans les plus gros pores et est entraînée par gravité et succion vers le bas, par succion « horizontale » vers les pores plus fins situés au même niveau. L'énergie de rétention (ou potentiel capillaire) pour l'eau se trouverait réduite dans ces pores fins au niveau considéré, et l'eau préexistante circulerait ainsi vers le bas dans le réseau de ces pores.

Nous avons déjà retenu une image analogue de succion « latérale » dans le cas de l'infiltration dans un sol sec (FEODOROFF, 1965). Cependant, nous ne pensons pas qu'elle soit applicable au cas d'un sol préalablement humide, car il est difficile d'admettre que des pores, aussi fins soient-ils, puissent exercer une succion sur de l'eau située au voisinage s'ils sont eux-mêmes déjà *saturés*.

Par contre, on peut imaginer que dans le cas considéré les choses se passent ainsi (fig. 6) : l'eau préexistante serait distribuée sous forme des « manchons » discontinus se raccordant aux minces films qui adhèrent aux particules solides. L'état d'équilibre serait essentiellement dû à l'équivalence des pressions capillaires, même valeur absolue mais sens contraire, existant aux ménisques A et B.

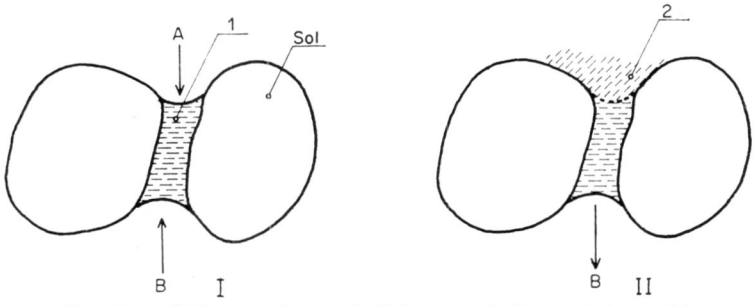


FIG. 6. — *Schéma représentant le déplacement de l'eau préexistante* (1) *sous l'effet de l'eau d'apport* (2)
I — Avant arrosage
II — Après arrosage

De l'eau arrivant au contact du ménisque supérieur (A) aurait pour conséquence de réduire sa courbure. L'équilibre étant rompu, le ménisque B entrerait en mouvement, entraînant l'eau préexistante. Dans son mouvement il rejoindrait d'autres ménisques A′ et ainsi de suite.

Comme l'eau d'apport provient d'en haut, on a toutes les raisons de penser que, quelle que soit la position initiale des « manchons », leur transfert global s'effectuera vers le bas, d'où l'effet de déplacement vertical de l'humidité préexistante.

En outre, la réduction de la pression capillaire à un des ménisques des « man-

chons » permettrait à ceux-ci de pénétrer, et de se maintenir, dans des vides plus gros, d'où l'accroissement de la teneur en eau à chaque niveau.

Enfin, les « manchons » les plus gros seraient affectés les premiers, ce qui expliquerait l'effet de « coin » à la base de l'eau d'apport et le maintien d'une faible part de l'eau préexistante même au voisinage de la surface.

CONCLUSIONS

Ce travail a permis en premier lieu de mettre au point une méthode d'obtention de colonnes de sol à profils hydriques uniformes en condition de non saturation. Ce procédé pourrait être utilisé également pour d'autres travaux (mouvement des solutés, vases de végétation, etc.) en milieu non saturé et contrôlé.

Les essais d'infiltration ont montré qu'on assiste à un déplacement de l'eau préexistante. Donc l'hypothèse d'une circulation préférentielle dans les plus gros pores ne serait pas à retenir, du moins pour les conditions d'humidité initiale et d'arrosage à faible intensité, réalisées dans nos expériences.

La possibilité de généraliser ces premières constatations dépendra des résultats qui pourront être obtenus ultérieurement avec des sols naturels, d'autres humidités initiales et des intensités d'arrosage éventuellement plus élevées.

Reçu pour publication en novembre 1966.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient M. BETREMIEUX, Directeur du Laboratoire des Sols, pour ses conseils et suggestions.

SUMMARY

EXPERIMENTS ON NON-SATURATING-WATER SEEPAGE
IN AN ALREADY-WETTED SOIL

There is but little information available concerning infiltration in a wet unsaturated soil, phenomenon often assumed to originate from a preferential penetration in the larger pores.

This study purposed to precise these processes and was carried out in the laboratory on a heated soil. In the first place, a new method allowed to obtain soil columns with an « initial » low but uniform with depth water content. This method consists in introducing a saturated paste into a cylinder and in extracting the water out of this paste down to the desired moisture, by a controlled depression. Water enriched with $CaCl_2$ was then supplied, with different amounts but the same intensity. The quantitative determination of chlorine after infiltration allowed to establish the position of the initial water and of the supplied solution.

The results show the substitution of the initial moisture, which extends fairly far ahead of the supplied water. It depends on the initial water content ; and secondly, the greater the water supply, the more marked it is.

This effect results probably from a mobilization of the water in the whole considered profile, which doesn't seem to correspond to a strictly preferential infiltration.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE VERSICKERUNG VON NICHT SATTINGENDEM WASSER IN EINEM VORHER FEUCHTEN BODEN

Die Versickerung in einem feucthen ungesättigten Boden stellt ein noch ungenügend erforchtes Phänomen dar, wofür die Hypothese eines vorzugsweisen Eindringens in die grossen Hohlräume oft herangezogen wird.

Vorliegende Arbeit, die in Laboratorium auf gebrannter Erde durchgeführt wurde, sollte diese Vorgänge aufklären.

Zunächst erlaubte eine neue Vorrichtung Bodensäulen mit einem niedrigen aber überall gleichmässigen « Ausgangs » -Wassergehalt zu erlangen. Mit dieser Methode wird einer gesättigte Teig in ein Zylinder hineingebracht und daraus wird das Wasser bis zum gewünschten Wassergehalt mittels einem kontrolliertem Vakuum extrahiert. Das Begiessen wurde dann mit $CaCl_2$ angereichertem Wasser durchgeführt. Verschiedene Dosen wurden mit derselben Intensität angewendet. Die nach der Versickerung durchgeführte Chlordosierung erlaubte die Lage des früher existierenden Wassers, sowie der zugebrachten Lösung festzustellen.

Die Ergebnisse zeigten, dass ein Ersatz des früher existierenden Wassers eintritt. Dieser Effekt verbreitet sich ziemlich weit stromabwärts des zugebrachten Wassers. Er ist von dem anfänglichen Wassergehalt abhängig und ist umso betonter als die Höhe des zugebrachten Wassers bedeutend ist.

Dieser Effekt ist wahrscheinlich einer Mobilisierung des Wassers des gesamten betrachteten Profils zuzuschreiben, was einer strikt vorzugsweisen Versickerung nicht entsprechen würde.

РЕЗЮМЭ

Опыты инфоильтрации ненасыщающей воды в предварительно увлажненную почву.

А. ФЕДОРОВ, Б. ЯРОН.

Инфильтрация в влажную почву — мало изученное явление, для объяснения которого часто прибегают к гипотезе предпочтительного проникновения в наиболее крупные поры.

Данная работа, целью которой является уточнение этого механизма, была проведена в лаборатории. В певую очередь, новая установка позволила получить исходные водные профили с низкой, но однообразной по глубине влажностью. Затем был проведен полив при помощи раствора хлористого кальция : были применены разные нормы с одинаковой интенсивностью. Дозаж хлора по окончании инфильтрации позволил установить соответственное расположение первоначальной влаги и внесенного раствора.

Результаты выявили вытеснение первоначальной влаги, распространявшееся на сравнительно далекое расстояние от поданной воды. Вытеснение это зависит от исходного содержания влаги и увеличивается с увеличением нормы полива.

Этот эффект является повидимому следствием мобилизации всей влаги данного профиля, что как-будто не соответствует исключительно « предпочтительной» инфильтрации.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALLIF J. L. et coll., 1966. Sur les modalités de la circulation en phase liquide de l'eau non saturante dans le cas de dessèchement d'un sol. *C. R. Acad. Sci.*, **262**, 1866-68.

BETREMIEUX R. et coll., 1960. Évolution de certaines propriétés du sol sous l'influence du chauffage. *C. R. Acad. Sci.*, **251**, 2753-55.

FEODOROFF A., BETREMIEUX R., 1964. Une méthode de laboratoire pour la détermination de la capacité au champ. *Sci. du Sol*, 109-118.

FEODOROFF A., 1965. *Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante.* Thèse, Paris.

HORTON J. H., HAWKINS R. H., 1965. Flow path of rain from the soil surface to the water table. *Soil Sci.*, **100**, 6, 377-383.

MC INNES D. A., DOLE M., 1928. Differential potentiometric titration. *J. amer. chem. Soc.*, **51**, 1119-27.

SHALHEVET J., YARON B., 1966. *NUIA Pamph.*, n° 103.

YARON B. et coll., 1966. A method for uniform packing of soil columns. *Soil Sci.*, **101**, 3, 205-209.

Ann. agron., 1967, **18** (1), 17-29.

LIAISONS ENTRE CUIVRE ET MATIÈRE ORGANIQUE DANS UN PODZOL DÉVELOPPÉ SUR SABLE DES LANDES ET ACCIDENTELLEMENT ENRICHI EN CUIVRE.

J. DELAS
avec la collaboration technique de C. MOLOT et J. GIRAUDON

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Ouest, 33 - Pont de la Maye

SOMMAIRE

L'étude des composés humiques extraits des horizons A_1 et B_1 d'un podzol enrichi en cuivre il y a 50 ans fait apparaître qu'une grande partie du métal est engagée dans des complexes organo-métalliques dont le radical organique est constitué par la fraction la plus mobile de ces composés humiques.

INTRODUCTION

La matière organique des sols joue dans la dynamique des métaux plurivalents un rôle particulièrement important, car elle peut former avec ces cations des complexes organo-métalliques. La répartition des métaux le long du profil, ainsi que leurs possibilités d'absorption par les végétaux, dépendant étroitement des caractéristiques de ces complexes, il est nécessaire, surtout dans le cas des sols pauvres en colloïdes minéraux, de connaître leur nature et leur stabilité. Mais ces recherches se heurtent à de grandes difficultés par suite du manque d'information concernant la nature chimique de la matière organique et du fait de son insolubilité.

Les complexes cuivre-matière organique ont fait l'objet de nombreuses études (BROADBENT et OTT, 1957 ; BROADBENT, 1957 ; NORTHMORE, 1959 ; TOBIA et HANNA, 1961 ; MORTENSEN, 1963 ; SCHNITZER et SKINNER, 1963 et 1965 ; MÜCKE et KLEIST, 1965) ; en raison de la très faible teneur des sols en ce métal, les recherches ont été conduites de manière indirecte, au moyen de sols ou de fractions organiques isolées de sols préalablement enrichis pour les besoins de l'étude.

Ayant trouvé, à la suite d'une prospection récente, un sol riche en matière organique (podzol) où l'on avait apporté il y a près de 50 ans des quantités considérables de cuivre, nous avons pu aborder analytiquement le problème des rapports cuivre-matière organique à partir d'un matériau ayant évolué pendant longtemps dans des conditions naturelles.

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES UTILISÉS

1.) *Caractéristiques du profil étudié*

Les prélèvements de sol ont été effectués à CESTAS (Gironde), dans une parcelle d'environ 1 000 m², où les échecs de culture se succèdent depuis des années ; l'analyse a montré qu'une teneur en cuivre extrêmement élevée était la cause de ces accidents.

Les caractéristiques chimiques principales du profil étudié, situé dans la zone des sols sableux des Landes de Gascogne, sont indiquées dans le tableau 1.

TABLEAU I

Caractéristiques chimiques du profil étudié

Horizon	A_1	B_1	B_2	
Profondeur (cm)	0-20	20-37	37-55	55 et au-delà
pH-eau	5,15	5,00	5,10	5,40
pH-KCl N	4,25	4,45	4,60	4,80
C total (‰)	29,46	23,17	4,91	3,73
N organique ‰	1,23	1,10	0,19	0,18
C/N	24	21	25	20
Acides humiques en C ‰	7,55	6,80	—	—
Acides fulviques en C ‰	1,98	11,37	—	—
Cuivre extrait en mg/kg de sol :				
par HCl 12 N	1 880	3 131	350	137
par l'acétate d'ammonium N à pH 7	603	999	—	—

Il s'agit d'un podzol humo-ferrugineux, développé sur lande humide (JUSTE, 1965) ; il n'est pas exclu qu'un léger remaniement superficiel ait pu se produire lors des tentatives de mise en culture.

L'accumulation de cuivre jusqu'à un niveau toxique pour toute végétation est due à des traitements fongicides destinés à assurer la conservation de troncs de pins stockés sur la parcelle ; ces traitements ont été effectués vers 1918-1920.

Il faut noter qu'une partie importante du métal apporté en surface a été entraînée en profondeur ; une telle migration n'avait jamais été observée en sols pauvres en matière organique (DELAS, 1963).

2.) *Choix de la méthode de travail*

Disposant d'un sol à haute teneur en matière organique et enrichi de longue date en cuivre, nous avons cherché à étudier les rapports qui avaient pu s'établir entre ces deux constituants en déterminant le taux de cuivre de diverses fractions organiques extraites de ces sols, les extractions étant parfois précédées de l'élimination du métal retenu de manière échangeable et labile.

Deux types de méthodes d'extraction et de séparation des composés humiques ont été utilisés :

— la méthode densimétrique : on sépare par différence de densité une fraction légère comprenant essentiellement des débris végétaux peu décomposés d'une fraction lourde, intimement liée à la matière minérale, où se trouvent les produits humifiés ; cette méthode semble ne pas devoir apporter d'importantes modifications d'ordre chimique aux liaisons cuivre-matière organique que l'on se propose d'étudier.

— la méthode chimique : les composés humiques sont extraits par un réactif alcalin, puis séparés par différence de solubilité dans un acide ; les risques de modification du système étudié sont importants, aussi faut-il réduire la durée de l'extraction et éliminer les réactifs trop alcalins, ainsi que ceux dotés de propriétés complexantes car ils peuvent libérer le métal de ses combinaisons organiques.

3.) *Méthodes expérimentales*

a) *Teneur en cuivre du profil.*

— Cuivre soluble dans HCl pur : on obtient par cette méthode la quasi-totalité du métal présent dans le sol. 1 g de sol porphyrisé est calciné 1 heure à 500°C ; après refroidissement et addition de 20 ml de HCl pur, on chauffe fortement au bain de sable, en évitant l'ébullition ; on filtre, on lave à plusieurs reprises et on amène à volume connu .

— Cuivre extractible par l'acétate d'ammonium : il s'agit de la fraction du cuivre total lié de façon labile aux colloïdes. 5 g de sol sont agités 2 heures avec 125 ml d'acétate d'ammonium N à pH 7.

b) *Extraction et fractionnement de la matière organique.*

Quelle que soit la méthode utilisée, elle est précédée dans certains cas de l'élimination du cuivre extractible par l'acétate d'ammonium.

— Méthode densimétrique : on utilise la méthode de MONNIER et *al.* (1962) ; on procède dans les 2 fractions, séparées par un mélange bromoforme-alcool de densité 2, au dosage du cuivre (après minéralisation) et à la détermination du rapport C/N.

— Méthode chimique : l'extraction par le pyrophosphate de sodium (DUCHAUFOUR et JACQUIN, 1963) n'a pas été utilisée en raison des propriétés complexantes de ce sel (DUCHAUFOUR, 1964) ; nous avons employé la soude 0,1 N après avoir vérifié qu'elle donnait, dans le cas du profil étudié, des teneurs en carbone des diverses fractions très voisines de celles que donne le pyrophosphate 0,1 M.

TABLEAU 2

Comparaison des teneurs en carbone des fractions humiques et fulviques extraites par Na OH 0,1 N et par $Na_4P_2O_7$ 0,1 M

(en p. 1 000 de sol)

Horizon	Fraction	Mode d'extraction	
		NaOH 0,1 N	$Na_4P_2O_7$ 0,1 M
A_1	Acides humiques	7,55	7,27
	Acides fulviques	1,98	1,98
B_1	Acides humiques	6,80	7,58
	Acides fulviques	11,37	12,67

5 g de sol sont agités pendant 1 heure avec 100 ml de NaOH 0,1 N ; après centrifugation (5 mn à 4 000 tours/mn), le culot est recueilli et le surnageant acidifié par SO_4H_2 pur jusqu'à pH 1 ; après 12 heures de repos, les acides humiques sont séparés des acides fulviques par centrifugation ; ces acides humiques sont redissous dans 1 ml de soude N.

Le carbone et le cuivre (après minéralisation) sont dosés dans la fraction humique, dans la fraction fulvique, et dans le culot initial (résidu de l'extraction sodique).

Électrophorèse sur papier des acides humiques. —Nous nous sommes inspirés de la technique décrite par JACQUIN (1963) . 50 µl d'acides humiques (précipités par HCl) sont déposés sur une largeur de 5 cm sur du papier Whatman n° 1 ; une tension constante de 7 volts/cm est appliquée pendant 3 heures ; 2 tampons ont été utilisés : tampon borate à pH 9,2 et tampon phosphate à pH 7,4. Sous l'action du champ électrique, les acides humiques se séparent en 3 fractions (DUCHAUFOUR et JACQUIN, 1963 ; JACQUIN, 1963) : une fraction reste près de la dépose (acides humiques gris), une autre migre vers l'anode (acides humiques bruns) ; ces deux fractions sont séparées par les acides humiques intermédiaires. Après densitométrie des électrophorégrammes, on les découpe perpendiculairement

au sens de la migration en bandes de 2 cm de largeur, où l'on dose le cuivre après minéralisation ; on mesure ainsi la quantité de métal qui est restée associée aux fractions humiques au cours de leur migration. On procède de la même façon pour l'azote mais, en raison des faibles quantités présentes, l'électrophorégramme n'est découpé qu'en trois bandes de papier, correspondant aux 3 fractions séparées ; on minéralise simultanément plusieurs bandes homologues provenant d'électrophorèses distinctes du même acide humique.

c) *Déterminations analytiques.*

Le cuivre est dosé dans les liquides d'extraction ou de minéralisation soit par colorimétrie à 5 450 Å du complexe 2-2′ diquinoléine-Cu^{+} (COPPENET et *al.*, 1954) pour les concentrations inférieures à 0,2 γ Cu/ml, soit par colorimétrie à 6 000 Å du complexe *bis*-cyclo-hexanone-oxalyldihydrazone-Cu^{++} (MAZOYER, 1958) pour les concentrations supérieures .

Le carbone et l'azote des fractions organiques ont été dosés selon la technique mise au point par ANSTETT (1956) ; l'azote organique des sols et des électrophorégrammes a été déterminé par la méthode de Kjeldhal.

II. — RÉSULTATS OBTENUS

Nous avons limité l'étude aux deux horizons supérieurs en raison de leur teneur élevée en cuivre.

1. *Fractionnement densimétrique de la matière organique*

Les teneurs en cuivre des deux fractions séparées par cette méthode sont indiquées dans le tableau 3 ; elles sont exprimées soit en mg de métal par kg de la fraction considérée, soit en pourcentage de la quantité totale.

Le mélange densimétrique alcool-bromoforme contient du cuivre (0,5 à 2 p. 100 de la totalité) qui ne peut provenir que de la dissolution de substances organiques intimement liées au métal.

Une partie importante du cuivre se trouve incluse dans la matière organique humifiée de la fraction lourde ; cette proportion s'accroît avec la profondeur.

La fraction légère, qui ne représente que 5 p. 100 environ du poids du sol, contient 57 p. 100 du cuivre total dans l'horizon A_1, 34 p. 100 dans le B_1 ; il ne semble pas que cette teneur très élevée soit due à la richesse en métal des débris végétaux peu humifiés car, depuis les apports de cuivre qui datent de 50 ans, aucune végétation qui aurait pu l'accumuler ne s'est développée sur la parcelle. Par contre, en raison d'une séparation imparfaite, il a pu se produire un passage dans la fraction légère de substances très humifiées, riches en cuivre, mais faiblement liées à la matière minérale de nature essentiellement quartzeuse. Deux faits semblent venir à l'appui de cette hypothèse :

— les rapports C/N des deux fractions sont assez peu différents, alors que dans le cas de séparation parfaite ce rapport est voisin de 10 pour la fraction lourde et dépasse 20 pour la fraction légère (MONNIER et *al.*, 1962) ;

— le traitement préalable à l'acétate d'ammonium ne modifie que très légèrement les teneurs en métal de la fraction légère, en raison de l'existence probable de liaisons organo-métalliques très stables que l'on doit attribuer aux composés humifiés présents dans cette fraction ; par contre, ce pré-traitement provoque une diminution considérable du cuivre contenu dans la fraction lourde car il entraîne le départ du métal fixé par la partie minérale du sol ou faiblement lié à la matière organique (à des acides organiques par exemple).

TABLEAU 3

Fractionnement densimétrique de la matière organique

Horizon	Mode d'extraction	Poids des fractions (% du total)		C/N des fractions		Teneur en Cuivre						
						Extrait par l'acétate de NH_4 N à pH 7		Liquide densimétrique p. 100 Cu total	Fraction légère		Fraction lourde	
		Légère	Lourde	Légère	Lourde	mg/kg de sol	p. 100 Cu total		mg/kg de la fraction	p. 100 Cu total	mg/kg de la fraction	p. 100 Cu total
A_1	Fractionnement normal	5,15	94,85	20	13	—	—	1,91	19 623	57,78	13 743	40,41
	Fractionnement précédé d'un traitement à l'acétate de NH_4	6,55	94,45	—	—	590	32,64	1,64	16 938	61,50	81	4,22
B_1	Fractionnement normal	3,15	96,85	21	26	—	—	1,59	34 280	34,44	2 077	63,97
	Fractionnement précédé d'un traitement à l'acétate de NH_4	4,94	95,06	—	—	992	30,98	0,59	25 448	39,43	972	29,00

TABLEAU 4

Extraction des composés humiques par la soude 0,1 N

Horizon	Mode d'extraction	Cuivre extractible par l'acétate d'ammonium N à pH 7		Cuivre lié aux composés humiques extractibles par NaOH N/10						Cuivre non extractible par NaOH N/10 (culot)		
				Acides fulviques			Acides humiques					
		mg/kg de sol	p. 100 Cu total	mg/kg de sol	p. 100 Cu total	mg/g de C	mg/kg de sol	p. 100 Cu total	mg/g de C	mg/kg de sol	p. 100 Cu total	mg/g de C
A_1	Fractionnement normal	—	—	756	40,11	381,81	83	4,40	10,99	1 046	55,49	52,53
	Fractionnement précédé d'un traitement à l'acétate de NH_4	593	31,36	688	36,39	—	81	4,28	—	529	27,97	—
B_1	Fractionnement normal	—	—	1 968	62,22	173,08	126	3,98	18,53	1 069	33,80	213,80
	Fractionnement précédé d'un traitement à l'acétate de NH_4	1012	31,62	1 688	52,73	—	120	3,75	—	381	11,90	—

2. *Extraction des composés humiques par la soude 0,1 N*

Les résultats obtenus par cette méthode de fractionnement chimique de la matière organique sont résumés dans le tableau 4 ; les teneurs en cuivre sont exprimées soit en mg de métal par kg de sol, soit en pourcentage de la quantité totale de cuivre, soit encore en mg de métal associé à 1 g de carbone de la fraction considérée.

L'examen de ces chiffres appelle les remarques suivantes :

— La fraction fulvique contient une quantité très importante de cuivre ; cette quantité, qui représente en surface 40 p. 100 du cuivre total, atteint 62 p. 100 en profondeur, mais comme la teneur en acides fulviques est 5 fois plus élevée dans l'horizon B_1 que dans le A_1, on doit admettre qu'une partie d'entre eux a migré antérieurement aux apports de cuivre ou indépendamment du métal, ou bien encore s'est transformée en acides humiques.

— Les acides humiques contiennent une faible proportion du cuivre total ; il y a en profondeur près de deux fois plus de cuivre associé au carbone des acides humiques qu'en surface.

— Une grande partie du métal n'est pas extraite par la soude et demeure dans le culot ; il peut s'agir de cuivre fortement lié aux constituants minéraux du sol et à de la matière organique très stable ou, au contraire, de cuivre faiblement retenu et précipité sous forme d'hydroxyde par le réactif sodique.

— Le traitement préalable par l'acétate d'ammonium ne diminue que légèrement la teneur en métal des acides fulviques ; celle des acides humiques reste inchangée ; seule l'hypothèse de liaisons très stables entre le cuivre et la matière organique, semblables à celles qui existent dans les complexes, peut permettre d'expliquer ces résultats. Le cuivre extrait lors de ce pré-traitement a pour origine principale la fraction de sol non solubilisée par la soude : il y a donc précipitation, lors de l'extraction sodique, de métal fixé de manière labile, à moins qu'il n'ait été éliminé au préalable par l'acétate d'ammonium.

3. *Étude par électrophorèse sur papier du cuivre lié aux acides humiques*

Nous avons cherché à vérifier l'hypothèse de l'existence de liaisons complexes cuivre-matière organique en procédant à l'étude par électrophorèse sur papier des acides humiques extraits par la soude 0,1 N.

Les résultats obtenus sont indiqués dans les figures 1, 2, 3, 4 où l'on a porté, en fonction de la distance à la dépose, l'enregistrement densitométrique ainsi que les teneurs en cuivre (exprimées en pourcentage de la quantité présente dans l'électrophorégramme) de chaque bande de papier de 2 cm de large découpée perpendiculairement au sens de la migration.

Il n'apparaît pas de différence de mobilité notable des fractions humiques selon que l'on utilise un tampon phosphate à pH 7,4 ou un tampon borate à pH 9. Une grande partie des acides humiques extraits des sols étudiés est constituée d'acides humiques bruns, peu polymérisés, mobiles, migrant vers l'anode. Plus de la moitié du métal lié à la fraction humique se déplace vers l'anode de façon tout à fait parallèle à celle des acides humiques bruns ; le cuivre est donc en grande partie engagé dans

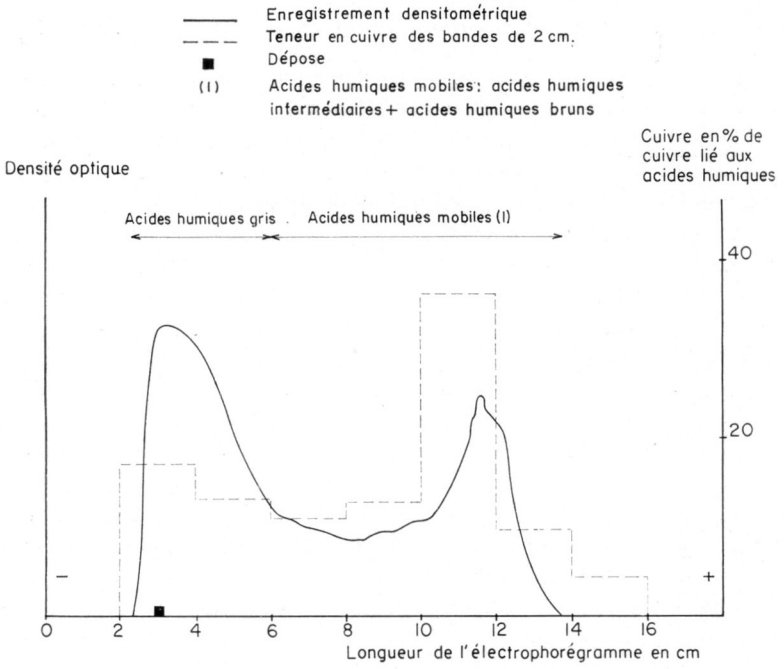


FIG. 1. — *Horizon A_1. Fractionnement normal (tampon phosphate).*

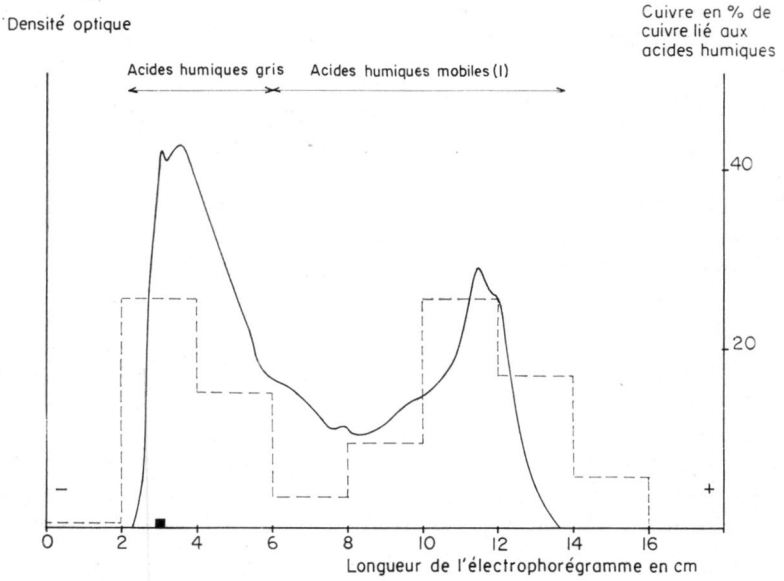


FIG. 2. — *Horizon A_1. Fractionnement précédé d'un traitement à l'acétate d'ammonium (tampon phosphate).*

Étude par électrophorèse du

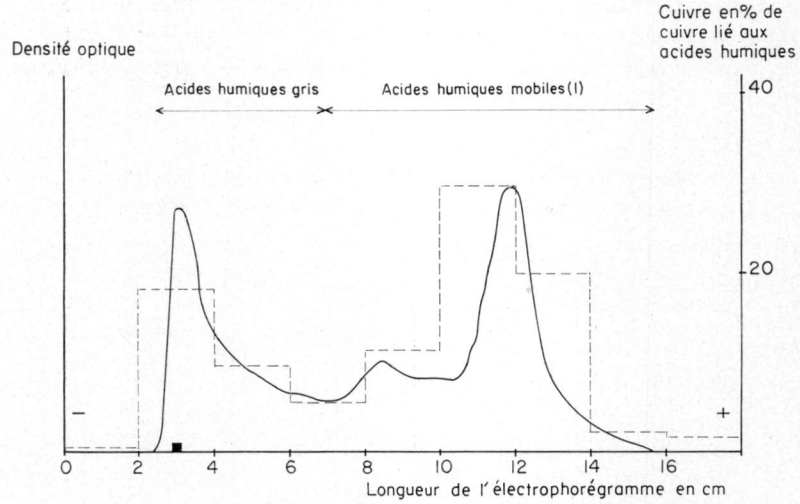


FIG. 3. — *Horizon B_1. Fractionnement normal (tampon borate).*

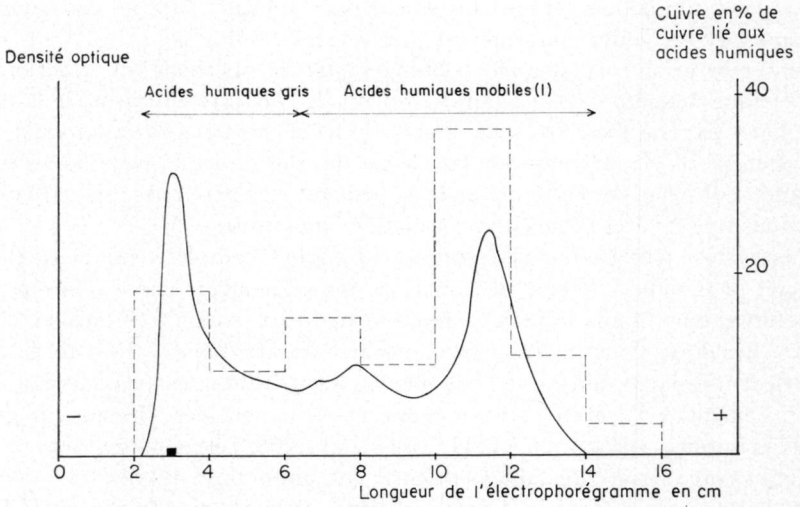


FIG. 4. *Horizon B_1. Fractionnement précédé d'un traitement à l'acétate d'ammonium (tampon borate)* cuivre lié aux acides humiques

des complexes électro-négatifs très stables. On doit noter que le traitement préalable du sol par l'acétate d'ammonium ne modifie ni les quantités de cuivre retrouvées dans l'électrophorégramme, ni leur répartition.

Ces résultats ont été complétés par le dosage de l'azote dans les électrophorégrammes.

Les chiffres du tableau 5 font ressortir nettement la migration de la majeure partie des composés azotés des acides humiques vers l'anode ; l'azote, comme le cuivre, se déplace donc de la même manière que les acides humiques bruns.

TABLEAU 5

Teneur en azote des acides humiques fractionnés par électrophorèse
(en p. 100 de l'azote total contenu dans l'électrophorégramme)

Horizon	Types d'acides humiques		
	Gris	Intermédiaires	Bruns
A_1	9,40	27,35	63,25
B_1	25,68	9,19	65,13

III. — DISCUSSION ET CONCLUSION

Des recherches de synthèse en laboratoire avaient antérieurement établi l'existence de liaisons complexes entre le cuivre et certaines fractions isolées de la matière organique des sols ; par l'étude du cas particulier d'un sol en place enrichi il y a 50 ans, ayant subi depuis cet enrichissement une évolution dans les conditions naturelles, nous avons voulu confirmer et préciser ces résultats.

L'interprétation des données obtenues par la méthode de fractionnement densimétrique des composés humiques s'est révélée délicate en raison de la difficulté déjà signalée par GREENLAND (1965) d'obtenir des séparations parfaites entre matière humifiée et débris peu décomposés dans le cas des sols sableux ; néanmoins, plusieurs des résultats obtenus par cette méthode ne peuvent être expliqués que par l'existence de relations très étroites entre cuivre et matière organique.

L'extraction par la soude des composés humiques, complétée par l'électrophorèse sur papier, a permis d'obtenir de nouveaux renseignements sur les liaisons cuivre-matière organique ; dans le podzol humo-ferrugineux étudié, ces liaisons sont très stables ; elles doivent, au moins partiellement, être attribuées à l'existence de complexes électro-négatifs, ainsi que l'ont montré les résultats des extractions précédées d'un traitement à l'acétate d'ammonium et l'examen des électrophorégrammes d'acides humiques ; MÜCKE et KLEIST (1965), utilisant l'électrophorèse pour étudier des fractions organiques préalablement enrichies, ont obtenu des résultats identiques.

Ces liaisons existent surtout entre le cuivre et la fraction la plus mobile de la matière organique, c'est-à-dire les acides fulviques et les acides humiques bruns ;

TOBIA et HANNA (1961) et MORTENSEN (1963) avaient déjà signalé le rôle essentiel de la fraction fulvique.

Il serait d'un grand intérêt de connaître la nature des fonctions responsables de la formation de complexes avec le cuivre ; le parallélisme observé entre la migration du cuivre et celle de l'azote vers l'anode des électrophorégrammes peut permettre d'orienter les recherches ; WALDRON et MORTENSEN (1961), étudiant la mobilité électrophorétique de fractions organiques, ont également mis en évidence qu'elle était en relation étroite avec celle des composés azotés contenus dans cette fraction organique : les fractions brunes, les plus mobiles, sont les plus riches en azote (sucres aminés, azote α aminé, azote total). Sans écarter l'hypothèse que la migration du cuivre et de l'azote vers l'anode soient des phénomènes indépendants l'un de l'autre, on peut penser que, parmi tous les donneurs d'électrons présents dans la matière organique et susceptibles de complexer le métal, l'azote joue un rôle particulièrement important : on connaît de très nombreux complexes de synthèse cuivre-acides aminés.

Les résultats de cette étude peuvent également contribuer à éclairer le comportement du cuivre en sol podzolique sableux : la fréquence des carences en cuivre ne s'explique pas seulement par la pauvreté de la roche-mère, mais aussi par la migration du métal lié à la partie mobile de la matière organique ; cette migration peut intéresser également les apports de cuivre faits en vue de corriger les carences, obligeant à renouveler assez souvent ces apports.

Inversement, dans le cas d'accumulation du cuivre jusqu'à un niveau toxique (sols viticoles par exemple), l'apport au sol de matières organiques devrait présenter des avantages particuliers : diminuer le caractère échangeable du cuivre, donc réduire sa nocivité, et donner naissance à des complexes mobiles de ce métal facilitant son entraînement dans les horizons inférieurs.

Reçu pour publication en janvier 1967.

SUMMARY

BONDS BETWEEN COPPER AND ORGANIC MATTER
IN A PODSOL DEVELOPED ON SAND OF THE LANDES
AND ACCIDENTALLY ENRICHED IN COPPER

A study was made of the copper content of horizons A_1 and B_1 of a humo-ferruginous podsol developed on quartzy sand, having received heavy applications of copper 50 years ago. The humic components were extracted and separated either by the densimetric method (alcohol-bromoform mixture), or by the chemical method (extraction by NaOH 0,1 N, separation into fulvic and humic acids by difference in solubility in SO_4H_2). In certain cases these extractions were preceded by an ammonium acetate treatment for the purpose of eliminating the copper fixed in a labile manner. In each of the fractions obtained, the copper and the C/N ratio were determined. Moreover, a study was made by electrophoresis on paper of the humic acids extracted by soda and the copper and the nitrogen were determined in the different parts of the electrophoregrammes.

The results obtained through separation by the densimetric method (table 3) are difficult to interpret by reason of the imperfect separation into sandy soils between humified and slightly humified fractions.

The extraction by soda (table 4) showed that the high copper content of the fulvic acids is not modified by a preliminary ammonium acetate treatment. The study by electrophoresis of the humic acids (figures 1 to 4) brings out a parallel migration of the copper and the nitrogen that they contain in the direction of the anode of the brown humic acids.

It therefore seems that the copper brought 50 years ago has formed stable organo-metallic complexes, some of which at least are electro-negative, with the most mobile fractions of the organic matter (fulvic acids and brown humic acids).

ZUSAMMENFASSUNG

BINDUNGEN ZWISCHEN KUPFER UND ORGANISCHEM MATERIAL
IN EINEM AUF DEM SAND DES DEPARTEMENTS « LANDES » ENTWICKELTEN,
UND UNERWARTET MIT KUPFER ANGEREICHERTEN, PODZOL

Der Kupfergehalt der Schichten A_1 und B_1 eines humus- und eisenhaltigen, auf quarzhaltigem Sand entwickelten Podzols, der vor 50 Jahren einer starken Kupferzufuhr ausgesetzt war, wurde untersucht. Die humushaltigen Verbindungen wurden entweder durch densitometrische Methode (Mischung Alkohol-Bromoform) oder chemische Methode (Extrahierung durch NaOH 0,1 N, Trennung in Fulvosäuren und Huminsäuren mittels Löslichkeitsunterschiede in H_2SO_4) extrahiert und getrennt. In bestimmten Fällen wurde eine Behandlung mit Ammoniumacétat vor diesen Extrahierungen durchgeführt, mit dem Ziel, das labil fixierte Kupfer zu beseitigen. In jedem der erhaltenen Fraktionen wurde das Kupfer und das Verhältnis C/N bestimmt. Ausserdem, wurden die mittels Natron extrahierten Huminsäuren durch Papierelektrophoresis untersucht ; ferner der Gehalt an Kupfer und Stickstoff in den verschiedenen Teilen des Elektrophoregrammes bestimmt.

Die Interpretation der nach der Trennung durch das densitometrische Verfahren erzielten Ergebnisse (Abb. 3) ist schwierig infolge der im sandigen Boden unvollkommenen Trennung zwischen der feuchten und wenig feuchten Fraktion.

Die Extrahierung durch Natron (Abb. 4) hat gezeigt, dass der hohe Kupfergehalt der Fulvosäuren durch eine Vorbehandlung mit Ammoniumacétat nicht modifiziert wird. Die Untersuchung der Huminsäuren mittels Elektrophoresis (Abb. 1 *bis* 4) zeigte eine parallele Wanderung in Richtung der Anode der braunen Huminsäuren und des darin enthaltenen Kupfers und Stickstoffs.

Es ist demnach zu vermuten, dass das vor 50 Jahre zugeführte Kupfer stabile metallorganische Komplexe mit den beweglichsten Fraktionen des organischen Materials (Fulvosäuren und braunen Huminsäuren) gebildet hat, von denen wenigstens einige elektronegativ sind.

Связь между медью и органическим веществом в подзолистой почве образовавшейся над песками Ланд и случайно обогашенной медью

Ж. ДЭЛЯ.

РЕЗЮМЕ

Автор провел изучение содержания меди в горизонтах A_1 и B_1 гуминово-железистой подзолистой почвы, образовавшейся на кварцевом песке и в которую 50 лет назад были внесены крупные количества меди. Извлечение и фракционирование гуминовых соединений были произведены при помощи денсиметрического (смесь спирт-бромоформ) и химического (экстракция при помощи NaOH концентрации 0,1 N, фракционирование на фульво-кислоты и гуминовые кислоты по разной растворимости в серной кислоте) методов. В отдельных случаях экстрагирование производилось после обработки почвы уксуснокислым аммонием, предназначенной для удаления лабильно фиксированной меди. В каждой полученной таким образом фракции определялись количество меди и соотношение C/N. Были проведены также с помощью электрофореза на бумаге изучение гуминовых кислот экстрагированных гидроокисью натрия и дозаж меди и азота различных частей электрофореграмм.

Из результатов полученных от фракционирования денсиметрическим путем (табл. 3) трудно вывести заключение в виду трудности точного разделения между фракциями содержащими крупные и менее крупные количества гумуса в песчаных почвах.

Извлечение при помощи гидроокиси натрия (табл. 4) показало что предварительная обработка уксуснокислым аммонием не уменьшает

повышенного содержания меди в фульвокислотах. Электрофоретическое изучение гуминовых кислот (рис. 1-4) указывает на параллельную миграцию коричневых гуминовых кислот совместно с медью и азотом, которые в них содержатся, по направлению к аноду.

Автор предполагает, поэтому, что медь внесенная 50 лет назад, образовала с наиболее подвижными фракциями органического вещества (фульвокислоты, коричневые гуминовые кислоты), постоянные металло-органические комплексные соединения, некоторые из которых являются электронегативными.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANSTETT A., 1956. Sur une méthode rapide de détermination du rapport C/N dans les sols, les amendements organiques et les végétaux. *VIe Congr. Sci. Sol*, B, 693-699.

BROADBENT F. E., 1957. Soil organic matter metal complexes II. Cation exchange chromatography of copper and calcium complexes. *Soil Sci.* **84**, 127-131.

BROADBENT F. E., OTT J. B., 1957. Soil organic matter-metal complexes. I. Affecting retention of various cations. *Soil Sci.* **83**, 419-417.

COPPENET M., DUCET G., CALVEZ J., BATS J., 1954. Microdosage colorimétrique du cuivre dans les végétaux par la 2-2'diquinoléine. *Ann. agron.* **4**, 597-600.

DELAS J., 1963. La toxicité du cuivre accumulé dans les sols. *Agrochimica*, **7**, 258-288.

DUCHAUFOUR Ph., JACQUIN F., 1963. Recherche d'une méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques contrôlée par l'électrophorèse. *Ann. agron.*, **14**, 885-918.

DUCHAUFOUR Ph., 1964. Évolution de l'aluminium et du fer complexés par la matière organique dans certains sols. *Sci. Sol.*, **2**, 3-17.

GREENLAND D. J., 1965. Interaction between clays and organic compounds in soils. *Soils Fertil.*, **28**. 415-426.

JACQUIN F., 1963. *Contribution à l'étude des processus de fermentation et d'évolution de divers composés humiques*. Thèse, Nancy.

JUSTE C., 1965. *Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique : application à leur mise en valeur*. Thèse, Nancy.

MAZOYER R., 1958. Sur une nouvelle méthode colorimétrique de dosage du cuivre dans les plantes. *Ann. agron.*, **9**, 299-300.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13**, 55-63.

MORTENSEN J. L., 1963. Complexing of metals by soils organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 179-186.

MÜCKE D., KLEIST H., 1965. Papierelektrophoretische Untersuchungen an Huminsäure-Metallverbindungen. *Albrecht Thaer Arch.* **9**, 327-336.

NORTHMORE J. M., 1959. Iodine and copper uptake by soil organic matter. *Nature*, **183**, 1309-1310.

SCHNITZER M., SKINNER S. I. M., 1963. Organo-metallic interactions in soils : I. Reaction between a number of metal ions and the organic matter in a podzol Bh horizon. *Soil Sci.* **92**, 86-93.

SCHNITZER M., SKINNER S. I. M., 1965. Organo-metallic interactions in soils. IV. Carboxyl and hydroxyl groups in organic matter and metal retention. *Soil Sci.* **99**, 278-284.

TOBIA S. K., HANNA A. S., 1961. Effect of copper sulphate added to irrigation water on copper status of Egyptian soils. 2. Free and complexed copper. *Soil Sci.* **92**, 123-126.

WALDRON A. C., MORTENSEN J. L., 1961. Soil Nitrogen complexes : II. Electrophoretic separation of organic components. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 29-32.

Ann. agron., 1967, **18** (1), 31-64.

CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE CATIONS DES SYSTÈMES RADICULAIRES ET DES SOLS, ET LEURS RELATIONS AVEC L'ALIMENTATION MINÉRALE

A. FRÉJAT, A. ANSTETT et F. LEMAIRE

Institut national de la Recherche agronomique,
Laboratoire de Chimie et de Science du Sol,
École nationale supérieure d'Horticulture, 78 - Versailles

I. — INTRODUCTION

Les racines des plantes sont considérées comme des systèmes colloïdaux, au même titre que les sols, aussi l'une de leurs caractéristiques les plus importantes est la capacité totale d'échange de cations, que l'on symbolise par la lettre T en France, ou les lettres C. E. C. = *cation exchange capacity* = capacité d'échange de cations, aux U. S. A. Cette valeur représente le maximum de cations exprimés en méq. pouvant être fixé sur les surfaces racinaires (généralement, les résultats sont exprimés en méq. pour 100 g MS).

De prime abord, la nutrition minérale des végétaux peut se ramener à la connaissance des équilibres physico-chimiques qui règlent les mouvements d'ions entre ces 2 systèmes colloïdaux possédant chacun à leur égard une énergie de fixation propre.

Toute polémique concernant le rôle positif ou nul de la solution du sol dans l'alimentation des plantes étant écartée, nous schématiserons celle-ci en fonction du degré d'intensification des cultures.

$$\underset{\text{Solution nutritive}}{T = O} \rightleftharpoons \underset{\text{Plante}}{T > O}$$

en culture hydroponique ;

$$\underset{\text{Sol}}{T > O} \rightleftharpoons \underset{\text{Solution du sol}}{T = O} \rightleftharpoons \underset{\text{Plante}}{T > O}$$

en culture hautement intensive (ex. culture sous serre) ;

$$\underset{\text{Sol}}{T > O} \rightleftharpoons \underset{\text{Plante}}{T > O}$$

en culture champêtre (extensive à intensive) ;

Nous utiliserons par la suite l'abréviation CEC plus explicite que T.

Précisons que cette CEC est pour les systèmes racinaires une donnée instantanée contrairement à la CEC du sol. En effet concernant ce dernier, la CEC est une caractéristique donc ne subissant guère de modification en fonction du temps. Pour la plante, par contre, la CEC du système radiculaire est non seulement fonction des conditions externes mais encore des conditions de métabolisme du végétal à un moment donné. Aussi, quand on détermine la CEC des racines on n'obtient qu'un cliché évoluant comme dans un film d'où, précisément, les difficultés d'obtenir des valeurs reproductibles.

Le plan de cette étude bibliographique comprend 3 grandes parties :

Étude de la CEC des racines.
Étude des relations Sol, Solutions du sol, Plantes.
Relation CEC et alimentation minérale des plantes.

II. — LA RACINE. SA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE CATIONS

1. *Introduction*

L'enracinement est très variable selon les différentes plantes ; malheureusement, les données que l'on possède ne permettent pas d'avoir une vue générale de la question. De plus, le développement du système radiculaire dépend de beaucoup d'autres facteurs (eau, semelle de labour, etc.). Cependant, en général, les végétaux à enracinement profond comme la luzerne, la betterave, absorbent plus d'éléments minéraux que les végétaux à système radiculaire superficiel comme les céréales.

VAGELER et RATH (in SCHEFFER WELTE, 1955) ont déterminé le nombre de radicelles chez les légumineuses et les graminées, lorsque le système radiculaire est complètement développé. Ils ont trouvé une valeur moyenne de $3 \cdot 10^{13}$ radicelles/ha pour 30 cm de sol. Les auteurs en déduisent que si l'on prend comme valeur moyenne une durée de vie de 2 jours, on obtient, pour une période de végétation de 4 mois, une capacité d'échange exprimée en protons de 36 kilovalences/ha alors qu'en réalité nos plantes de cultures, lors de rendements maxima, n'absorbent en bases (cations métalliques), que 5 à 6 kilovalences/ha. Nous voyons donc déjà que la plante présente une disproportion entre ses possibilités d'absorption et l'absorption réelle. Pour éclaircir cela, il nous faut examiner de manière plus précise la donnée statique que constitue la CEC des systèmes racinaires, l'absorption proprement dite des éléments et les rapports dynamiques existant entre la racine et le sol.

2. *La membrane racinaire*

Dans ses études sur les propriétés physico-chimiques de la membrane radiculaire, LUNDEGARTH, en 1942, conclut que la surface racinaire est chargée négativement, ce qui expliquerait la forte absorption cationique par les racines. De plus, pour lui, la totalité des surfaces de l'ensemble des cellules épidermiques du chevelu racinaire se caractérise comme étant une « couche de surface », se comportant comme un colloïde amphotère avec prédominance du caractère acide. La balance des ions dans cette couche pourrait être un facteur très important dans l'absorption des ions nutritifs du sol.

Aussi TENDELOO et VERVELDE en 1944 ne font-ils qu'appuyer les conclusions précédentes lorsqu'ils considèrent les racines des plantes comme des solutions de molécules et de complexes moléculaires possédant des propriétés basiques et acides, tout ceci étant compris dans la mince membrane surtout cellulosique. C'est ce que VENEMA (1952) et HARTREE (1957) approuvent également. Les racines des plantes peuvent être caractérisées par leur constante de dissociation. WILLIAMS et COLEMAN (1950) indiquent l'existence d'une double couche d'ions associés aux surfaces racinaires et ils constatent que l'entrée des cations dans cette double couche s'effectue dans l'ordre des capacités décroissantes de remplacement :

$$H^+ > Ba^{++} > Ca^{++} > Mg^{++} > Cs^+ > Rb^+ > NH^{4+} > K^+ > Na^+ > Li^+$$

A notre avis, cette série n'a vraisemblablement pas le caractère universel qu'on lui prête.

VERVELDE (1953) étudie les potentiels électriques des surfaces racinaires et trouve que la distribution ionique à travers la membrane extérieure des cellules périphériques de la racine est en accord avec les équilibres de DONNAN. Selon un article paru dans *Science* (1962), les racines des plantes contiennent beaucoup de groupes $-COO^-$ pouvant absorber des cations. Les cellules contiennent aussi des quantités considérables de protéines dont les groupements aminés prennent partiellement une charge positive en milieu acide. Ces groupes sur les surfaces racinaires peuvent alors être une source potentielle de sites chargés positivement intervenant dans l'adsorption et les échanges anioniques ce qui est prouvé grâce à des colorants acides tels que la fuchsine acide qui rougit au contact avec les racines.

Quant à CHAUSSIDON, il estime (1963) que des expériences totalement probantes, mettant en évidence la nature physico-chimique exacte de la surface racinaire, sont encore rares. Cependant, les connaissances actuelles sont suffisamment avancées pour que l'on puisse faire état de l'existence, à la surface des poils absorbants, de sites ionisés ou ionisables constitués par des groupements aminés et carboxyliques conférant à cette partie du végétal une charge électrique superficielle.

3. *La capacité d'échange de base des racines*

a) *Historique.*

DEVAUX en 1916 fut le premier à rapporter l'existence de la capacité d'échange des racines. En effet, il trouve une similitude remarquable entre les propriétés absorbantes du sol à l'égard des solutions salines et celles que présentent aussi les parois cellulaires des plantes vivantes. Dans les deux cas, la fixation porte essentiellement sur les bases et celles-ci peuvent se chasser mutuellement avec réversibilité du phénomène. Pour lui, la paroi des poils radiculaires et les particules du sol en contact intime forment un système colloïdal ayant partout les mêmes propriétés absorbantes. Les bases ne sont pas retenues et mises en réserve seulement dans le sol, elles le sont aussi dans l'enveloppe cellulaire à la portée immédiate du protoplasme.

Mc GEORGE en 1932, sur les tissus des plantes séchées à l'air montre qu'ils ont une propriété définie : celle d'absorber des bases ou l'ion H^+ et de les échanger avec d'autres bases dans les proportions stœchiométriquement équivalentes. Par là, il suggère que les tissus vivants peuvent montrer ces mêmes propriétés, en particulier les racines et les parties aériennes. Puis en 1940, BROYER et OVERSTREET commencent

l'étude de cette capacité d'échange de base en examinant l'influence des facteurs du métabolisme sur les mouvements d'échange des cations et leur accumulation par les racines, et cela grâce à l'emploi des isotopes radioactifs. RATNER (1944) suggère qu'il existe entre le sol et la plante un échange de cations en équilibre dynamique ; MATTSON (1948 et 1949) publie les premières valeurs de la CEC des racines de quelques plantes cultivées. WILLIAMS et COLEMAN (1950) préconisent une méthode de dosage de la CEC et prouvent que celle-ci est indépendante du métabolisme racinaire, ce qui serait à vérifier.

DRAKE (1951), publie une autre méthode de dosage de la CEC et relie la CEC à l'alimentation minérale des plantes.

Puis, jusqu'à nos jours, nous avons une suite de travaux intéressant spécifiquement cette CEC. Ils tentent soit de l'expliquer, soit d'en étudier les variations. par exemple : les travaux de VENEMA (1952), Mme BLANC-AICARD (1955), MCLEAN (1956 et 1957), CROOKE (1958, 1960 et 1962), HELMY et ELGABALY (1958), WIERSUM et BAKEMA (1959), MITSUI (1960), ASHER (1961), HEINTZE (1961).

b) *Origine du phénomène de la CEC.*

Pour DEVAUX (1916), la CEC était attribuée à la présence de pectose dans les membranes du chevelu racinaire. OSTERHOUT pense que la substance de la plante responsable de l'absorption des cations peut être assimilée à des phénols. CROOKE confère ce rôle aux amino-acides de la membrane. LUNDERGARTH parle de substances dissociées avec les H^+ et les OH^- à la surface des cellules épidermiques et les racines acquièrent leur potentiel négatif à cause de la grande dissociation des groupements acides. MATTSON montre que les substances pectiques des cellules épidermiques du Pois sont responsables de la CEC.

Selon BERSIN (1950), la CEC des racines est due : 1°) à la paroi cellulaire morte (cellulose, lignines, polyuronides), 2°) à la membrane protoplasmique (protéines).

KELLER et DEUEL (1957), estiment que la CEC des racines serait due aux groupements carboxyliques libres des pectines de la racine pour 70-80 p. 100. CROOKE et KNIGHT (1960) estiment que pour la Betterave, la CEC est due à 100 p. 100 au contenu pectinique.

LUNDEGARTH considère que les groupes responsables de la CEC pourraient être des radicaux orthophosphoriques.

Quelle que soit finalement la nature de ces groupes sur la surface racinaire, il est prouvé néanmoins que les ions H^+ produits par les processus métaboliques sont présents sur les surfaces racinaires ; ces H^+ sont rapidement échangés avec les cations métalliques. Ainsi, ces H^+ échangeables situés sur les surfaces racinaires constituent l'explication de la CEC pour WILLIAMS (1950), GRAHAM et BAKER (1951).

SCHEFFER et WELTE (1955), considèrent que la quantité d'H^+ produite par la plante peut être considérée comme l'équivalent théorique des bases adsorbées. Cependant, il faut tenir compte du fait que tous les H^+ de la surface racinaire ne sont pas intégralement échangeables avec les cations, de sorte qu'il faut parler d'ions H^+ actifs qui ne représentent qu'une fraction de la quantité totale d'H^+.

A partir des quantités de bases absorbées par les récoltes maximales, on peut calculer une puissance en potentiel d'échange, les cations métalliques absorbés transformés en H^+ représentant les H^+ actifs.

Selon VAGELER, les quantités d'H^+ actifs ou utilisables pour les diverses cultures, sont les suivantes :

	kilo équivalents/ha
Céréales	4 à 6
Maïs et millet	6 à 8
Pomme de terre	5 à 15
Canne à sucre	20 à 30
Betterave	15 à 25
Chanvre	20 à 25
Tabac	5 à 7
Caféier et théier	3 à 7
Arbres fruitiers	2 à 6
Feuillus	2 à 4
Résineux	1 à 3
Bananier	20 à 30

Dans leurs déterminations, GRAHAM et BAKER (1951) découvrent que les quantités d'H^+ étaient variables suivant la fertilisation reçue par les plantes au cours de leur croissance, suivant l'âge et l'espèce de la plante, et suivant la température à laquelle celles-ci poussaient, ce qui est en contradiction avec les affirmations de WILLIAMS et COLEMAN (1959). HELMY en 1958 et HEINTZE en 1961 ont poursuivi l'étude des facteurs affectant la CEC.

c) *Détermination de la CEC.*

Les différentes méthodes utilisées pour mesurer les propriétés d'échange des racines peuvent se classer en 3 groupes, classement établi par Mme BLANC-AICARD (1955) et repris par HEINTZE (1961) :

1° Mesure de la capacité d'échange par saturation des racines avec une solution d'un sel neutre et mesure de la quantité de cations fixés par échange avec une « solution de remplacement ». Ce principe simple a été employé par WILLIAMS et COLEMAN (1950), Mme BLANC l'a particulièrement étudié en France, et BLANCHET l'a adopté dans ses recherches sur l'alimentation minérale des plantes.

2° Utilisation des titrages potentiométriques par GRAHAM et BAKER (1951) : ces auteurs mesurent les H^+ échangeables présents à la surface de la racine par addition d'eau de chaux jusqu'à pH 7. Ils répètent la même mesure après électrodialyse des racines, ce qui leur permet de déterminer la capacité d'échange totale des racines. Les cations recueillis au cours de l'électrodialyse sont titrés par HCl 0,1 N et exprimés comme cations autres que les protons.

Cette méthode fut reprise dans son principe par DRAKE et MEHLICH (1951), de même que par MITSUI (1960). Ce dernier auteur n'utilise qu'une méthode de dialyse beaucoup plus courte que celle des techniques précédentes et il n'emploie pas d'acide.

3° Mesure de l'activité cationique dans les systèmes radiculaires au moyen d'une électrode à membrane d'argile. C'est la méthode utilisée par MCLEAN et BAKER (1953). Elle a permis aux auteurs de mesurer l'énergie de fixation des cations mono- et bivalents chez différentes espèces.

HEINTZE en 1961 a utilisé le même principe.

TABLEAU I

Capacité d'échange des racines de plantes cultivées selon divers auteurs
(plantes non ligneuses)

Plantes déterminées	CEC en méq. p. 100 MS	Auteur
Dicotylédones :		
Delphinium ajacis	94,35	DUNHAM
	94,00	DRAKE
Lactuca sativa	65,10	"
Glycine mas	65,10	"
Matthiola incana annua « Lilac »	58,08	DUNHAM
Vicia sativa vesca	53,6	MCLEAN
Lupinus angustifolius	53,3	DRAKE
Lupinus polyphyllus	40,41	DUNHAM
Ambrosia artemisiaefolia	58,9	DRAKE
Daucus carota sativa	51,7	"
Pisum sativum arvense	71	MATTSON
	49,6	DRAKE
Trifolium pratense	47,5	DRAKE
Limonium sinuatum Market	44,63	DUNHAM
Trifolium repens	43,4	DRAKE
Medicago sativa	46,8	MCLEAN
« Atlantic »	48,0	DRAKE
« Kansas »	40,0	"
Vicia villosa	44,1	GRAY
Amarantus retroflexus	42,3	DRAKE
Polygonum pensylvanicum	41,1	"
Portulaca oleracea	40,7	"
Fagopyrum esculentum	39,6	"
Solanum tuberosum	38,1	"
Lycopersicum esculentum	34,6	"
Pelargonium domesticum	32,6	DUNHAM
Monocotylédones		
Phalaris arundinacea	30,8	DRAKE
Festuca elatior	30,4	"
Cyperus esculentus	28,7	"
Narcissus Tazetta « Paper withe »	27,48	DUNHAM
Ray-grass anglais « Primevert »	27,4	Mme BLANC
Dactylis glomerata INRA souche 1	26,9	"
Zea mays indentata	26,0	DRAKE
Hordeum vulgare	25,3	MATTSON
	12,3	DRAKE
Bromus inermis	24,8	"
Poa compressa	24,1	"
Phleum pratense	22,6	DRAKE
Zea Mays saccharata	22,8	"
Arrhenatherum elatius	22,5	"
Poa pratensis	21,6	"
Phleum pratense « Maintenon »	20,4	Mme BLANC
49 V 46	26,9	"
49 V 47	32,0	"
Lolium italicum « RITO »	20,8	"
Agropyrum repens	19,8	DRAKE
Agrostis alba	17,3	DRAKE
Agrostis tenuis	16,3	"
Panicum miliaceum	12,2	"
Setaria glauca	11,4	"
Triticum vulgare	9,0	"

d) *Résultats de ces déterminations et remarques*

Remarques concernant les valeurs obtenues (tableaux 1 et 2) :

TABLEAU 2

Capacité d'échange de base des systèmes radiculaires de quelques espèces arbustives

Espèces	CEC en méq./100 MS	Auteur
Citronnier	30	SMITH et WALLACE
Oranger amer	25	—
Oranger doux	23	—
Pamplemoussier	21	—
Poncirus trifoliata	32	—
Avocatier mexicain	84	—
Pêcher	24,5	—
Mandarinier	15,7	MORITA et AOKI
Pamplemoussier	11,7	—
Kaki japonais	7,7	—
Poirier	7,6	—
Pêcher	6,0	—
Porte-greffes de vigne	Gamme assez large (voir Mme BLANC)	Mme BLANC

— Ce qui frappe à première vue, c'est la faible CEC des monocotylédones les dicotylédones, par contre, ont une CEC élevée variant de 40 à 60 méq. (sauf la Tomate, 35 méq, et le *Chenopodium album* 25 méq). Cette constatation a été faite par tous les chercheurs étudiant la CEC.

— Pour une même espèce, la CEC varie avec la méthode de détermination, ainsi MATTSON trouve pour l'orge 25,3 méq. et DRAKE 12,3 méq.

— Dans plusieurs études sur cette question, nous avons constaté l'absence d'indication concernant la méthode employée, l'absence totale de signification de certains résultats : par exemple, on ne précise pas si la CEC se rapporte à la matière sèche ou à la matière fraîche et à quelle quantité. De plus, aucune allusion n'est faite quant aux facteurs intervenant sur la valeur de la CEC comme l'âge de la plante, le cultivar, etc.

— Les résultats concernant les plantes maraîchères et les arbres fruitiers sont relativement rares.

— Les résultats pourraient être ramenés à l'hectare si l'on connaissait le poids de matière sèche du système radiculaire total d'une plante et le nombre de pieds à l'hectare. Pour nos plantes agricoles courantes et pour 1 Tonne de MS de système radiculaire à l'hectare, il faut compter une CEC totale de 0,6 kg valence/ha, ce qui constitue un chiffre très général et, vu la durée de vie moyenne d'une radicelle de 2 jours et pour une durée de végétation de 4 mois, cela nous donne $\frac{0{,}6 \times 120}{2} = 36$ kg équivalents/ha.

e) *Facteurs de variabilité de la CEC des surfaces racinaires.*

1. *La CEC et le contenu pectinique des plantes*

KELLER et DEUEL (1957), démontrent que dans une racine, lorsque le contenu pectinique augmente, la CEC augmente aussi et que la richesse pectinique des racines des diverses espèces est différente, d'où les variations de leurs CEC respectives.

Ainsi, par exemple :

TABLEAU 3

Espèces	CEC	Pectines
Blé	25 méq. pour 100 g MS	25 mg pour 100 g MS
Tomate	62 —	72 —

CROOKE et KNIGHT (1960) étudient cette variation, mais pour une seule espèce en fonction des distances de l'apex. Ils prouvent que l'extrémité des racines est la plus active, comme il ressort du tableau ci-dessous :

TABLEAU 4

Distance de l'apex en mm	CEC méq./100 g MS	Pectines mg/100 g MS	Respiration $CO_2 cm^3$/100 g/heure	N p. 100 de MS
0 - 2,5	134	63	212	2,17
2,5- 5	120	56	201	2,15
5 - 10	57	53	152	2,06
10 - 20	65	51	160	2,06
20 - 40	39	50	130	1,96
40 - 60	28	48	114	1,92
60 - 80	26	48	116	
80 -100	30	45	110	
100 -120	33	50	94	
120 -140	46	36	80	
Racine entière	26			1,64

Ces résultats montrent qu'il n'y a pas proportionnalité entre la CEC et la teneur en pectines, bien qu'il semble y avoir une relation. Il en est de même pour la relation taux d'N et taux de pectines en fonction de la distance.

2. *Variation de la CEC avec l'alimentation N et le taux de N de la plante*

L'influence de la nutrition azotée sur les propriétés d'échange des racines a été étudiée par WELCH, WALLACE et MULLER (1954), WANDER, CAHOON et CRUMETT (1955), SMITH et WALLACE (1955) et par CROOKE et KNIGHT (1960).

Ces auteurs signalent une action possible de la nutrition azotée sur la CEC des racines mais les résultats obtenus varient avec les formes de l'azote et les espèces cultivées.

Les premiers, McLEAN, ADAMS et FRANKLIN (1956) ont mis en évidence une corrélation positive entre la CEC et la teneur en N des racines d'une vingtaine d'espèces (fig. 1).

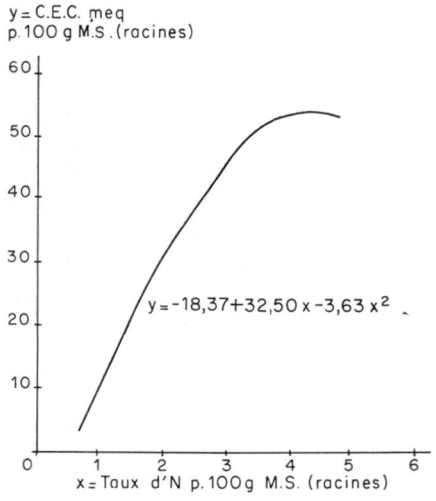


FIG. 1

HELMY et ELGABALY (1958) trouvent que la CEC et le taux d'N total des racines augmentent avec l'accroissement du taux d'N du milieu sol.

Mme BLANC-AICARD (1958) conclut de ses expériences sur la nutrition azotée qu'il ne lui a pas été possible de confirmer les résultats obtenus par McLEAN et ses collaborateurs, et cela qu'il s'agisse d'espèces différentes ou de différents cultivars d'une même espèce.

TABLEAU 5

Teneur en N de la solution nutritive méq./l	*Phleum pratense*		*Dactylis glomerata*		*Lolium perenne*	
	N p. 100 MS	CEC méq./100 MS	N p. 100 MS	CEC méq./100 MS	N p. 100 MS	CEC méq./100 MS
1	1,54	28,4	1,42	47,2	1,24	38,0
5	1,93	31,3	1,91	57,8	1,52	43,6
10	2,34	39,8	2,38	53,7	2,50	47,6

Cependant ces chiffres confirment les résultats d'HELMY et ELGABALY. Pour Mme BLANC, c'est en partie par une action indirecte sur la morphogenèse de la racine que l'N est susceptible de modifier ses propriétés d'échange ; en effet, l'apport d'N se traduit par l'apparition de racines très fines donc de surface supérieure, pour un

poids donné, en comparaison avec les racines de milieu carencé en N. Or, la CEC est fonction de la surface, donc si la surface augmente, la CEC augmente aussi. HEINTZE en 1961 conclut de la même façon en précisant bien que l'absence de corrélation étroite entre la CEC et le taux de N des racines ne permet pas de conclure à une constitution azotée des sites actifs concernant l'échange de cations. Cela favoriserait plutôt une fixation anionique.

3. *Variation de la CEC avec le milieu de culture de la plante*

DUNHAM (1956) affirme que le substrat dans lequel les plantes poussent, ne modifie pas la CEC si les échantillons ont une maturité physiologique comparable.

Cependant, si HEINTZE (1961) montre que les graminées prairiales présentent une grande constance dans les différents milieux quant à leur CEC, il constate que les plantes cultivées en pleine terre ont des valeurs inférieures à celles trouvées pour les mêmes plantes poussant en pot (tabl. 6). Malheureusement dans cet essai l'on compare des choses non comparables, car la texture n'est pas la même. Il rejette l'explication basée sur la perte de fines racines des plantes prélevées en plein champ.

TABLEAU 6

Espèces	Cultures au champ		Cultures en pot	
	limon sablonneux	argile avec cailloux	gravier	sable et vermiculite
Ray-grass anglais	23	24	23	23
Trèfle.....	14	16	46	21
Orge		17	23	
Blé d'hiver.....	10	14	18	

D'après ces chiffres, il admet une certaine modification de la CEC en fonction du substrat.

4. *Variation de la CEC en fonction des espèces, des cultivars, des races*

En dehors des différences concernant les valeurs de la CEC en fonction des espèces, comme nous l'avons vu, des différences pour une même espèce en fonction des cultivars ont été observées par de nombreux auteurs. Par exemple, DUNHAM en 1956, lors des déterminations de CEC sur plantes ornementales, trouva les chiffres suivants :

	méq./100 g MS
Chrysanthemum hortensis cultivar *Indianapolis*	45,22
— — — *Mefo*	43,20
— — — *Courtier*	40,73
Antirrhinum majus (muflier) *Skycraper*	26,69
— — — *Sunray*	19,30

LINGLE et CAROLUS ont constaté que la CEC plus faible de la variété *Utah 10 B* de céleri-branche expliquait l'absorption significativement plus élevée de Na et de K par rapport au cultivar *Summer Pascal* à CEC élevée et qui absorbe davantage de Ca et de Mg.

MOUAT (1962) et EPSTEIN (1963) trouvèrent, lors des mesures de la CEC de 7 souches de plants de Ray-grass dérivant des croisements de *Lolium perenne* × *L. multiflorum*, des différences variétales allant de 17,2 à 24,9 méq./100 g MS. En n'incluant pas la souche la plus aberrante, les 6 autres souches ne sont qu'à plus ou moins 10 p. 100 de la moyenne. Ces différences, quoique peu importantes, sont statistiquement significatives. Il y a donc des variations génétiques, aussi la sélection sur la base de la CEC pourrait être envisagée pour des plantes vivant en association sous des conditions d'alimentation relativement limitées, comme nous le verrons plus loin.

5. *Variation de la CEC en fonction de l'âge de la plante*

MALQUORI (1964) affirmait (ce que des recherches récentes ont confirmé) que le pouvoir d'échange cationique des racines des plantes cultivées n'est pas constant pendant le cycle biologique des cultures mais qu'il subit des fluctuations, même journalières.

En effet, DUNHAM dès 1956 remarqua que les vieilles racines ont une plus faible CEC que les jeunes. SMITH et WALLACE, la même année, le remarquent également dans leurs publications sur la CEC des *Citrus* :

TABLEAU 7

Espèce		CEC en méq./100 g MS
Citronnier	1	30
	2	54
Oranger amer	1	25
	2	45
Oranger doux	1	23
	2	40
Pamplemoussier	1	21
	2	49
Pencirus trifoliata	1	32
	2	54

1 = racines d'arbres provenant d'un semis en pleine terre de 3 ans d'âge.
2 = racines de semis en serre de 7 semaines d'âge.

Là encore, on peut reprocher l'absence d'utilisation du même substrat, car celui-ci interfère comme nous l'avons vu.

En 1958, HELMY et ELGABALY trouvent les résultats suivants sur l'orge :

TABLEAU 8

Age en jours	CEC méq./100 g	Acidité titrimétrique en méq./100 g
3	7,77	38,00
6	5,04	24,53
9	4,68	20,80
12	3,83	16,61

Donc avec l'âge, la CEC diminue d'abord rapidement, puis plus lentement, GRAHAM et BAKER trouvent les mêmes résultats. Le taux d'acides dans la racine montrait une évolution similaire. Ils expliquent ce fait de deux façons :

— les substances pectiniques constituant environ 50 p. 100 des parois cellulaires des jeunes tissus diminuent pour ne représenter que 0,1 à 1,5 p. 100 des tissus mûrs ;

— le rapport des parties terminales hautement actives de la racine sur les parties relativement inactives des racines devient plus petit au fur et à mesure que la racine vieillit.

HEINTZE en 1961 regrette que la plupart des études sur l'effet de l'âge et la CEC aient été faites sur des plantes âgées de moins de 1 à 2 semaines. Ses recherches sur le blé d'hiver avec des mesures de la CEC tous les mois et durant 7 mois montrent une petite et non constante variation dans la CEC. Chez le Pois, il constate une augmentation de la CEC entre le semis et le stade de la floraison, alors que la majorité des autres plantes subissent le phénomène inverse. Ainsi, un trèfle de 2 mois a une CEC de 16 méq., alors que celui de 6 mois n'a plus qu'une CEC de 8 méq. pour 100 g de racines (MS).

6. *Effet de substances chimiques*

HELMY (1958) démontre que NaCN, Na_3AsO_3 réduisent la CEC déjà à faible concentration. L'effet du 2-4-D se résume en une augmentation de la CEC à faible concentration et une diminution à forte dose. L'éthanol et surtout l'éther diéthylique diminuent cette CEC, de même que l'eau bouillante. On peut se demander si l'explication de ces faits ne se trouverait pas dans l'étude de l'incidence de ces substances sur la croissance du système radiculaire.

7. *Effet des métaux lourds*

Estimant qu'il y avait peu de travaux faisant allusion à la toxicité des métaux lourds sur la CEC des plantes, CROOKE (1958) démontre que pour la tomate, le pois, le haricot, l'avoine, les excès de Ni, Co et Zn produisent une augmentation de la CEC, le Mn une diminution. L'excès du Cu produit une augmentation de la CEC des racines de l'avoine, et une réduction dans le cas de la tomate. du pois et du haricot. Quant à expliquer ces faits, la question reste ouverte. Cela est, par exemple, étonnant pour le cobalt, car on admet généralement qu'il est sans effet sur le monde végétal.

8. *Variation de la CEC avec les méthodes de détermination*

On ne peut pas dire *a priori* que les différences relevées dans la littérature soient exclusivement dues aux diverses méthodes de détermination, puisque nous venons de voir qu'un certain nombre d'autres facteurs intervenaient, facteurs qui ne sont, en général, jamais précisés.

Ainsi, l'on peut, d'après les chiffres suivants, constater des variations importantes mais, cependant, par rapport aux moyennes, il y a une certaine tendance.

TABLEAU 9

Auteurs	Blé	Orge	Maïs	Trèfle blanc	Pois	Ray-grass
Drake	9	12	26	47	—	24
Mac Lean	14	13	13	—	—	24
Mattson	—	22	—	—	71	—
Graham	20	23	—	—	—	—
Blanc-Aicard	—	—	25	—	44	38
Keller	23	—	29	—	—	—
Heintze	18	22	14	46	48	23
Moyenne	16	18	21	46,5	58	27

On trouve en outre des différences dans les valeurs de la CEC, déterminées selon une seule méthode ; par exemple, dans la méthode de Williams et Coleman, si l'on fait varier la concentration de l'acide, le temps de contact, la concentration de la solution de sel neutre, le cation employé, les résultats varient, comme le remarquait Mme Blanc-Aicard (1955).

Ainsi, pour que les résultats soient valables, la publication de chiffres concernant la CEC de racines devrait s'accompagner de la définition stricte des différents facteurs agissant sur les valeurs analytiques de la CEC, ce qui fait souvent défaut.

f) *Capacité d'échange de base des racines et composition minérale des plantes.*

Mme Blanc-Aicard (1955) dans les conclusions de son étude sur l'adsorption radiculaire des cations faisait la remarque suivante : « il serait intéressant de voir s'il existe une relation entre l'adsorption des ions et leur accumulation dans la plante ». En 1962, Crooke et Knight publient les résultats de leurs travaux concernant la composition minérale d'un grand nombre de plantes à la lumière de la CEC de leurs racines (tableau 10) et concluent :

— il existe une bonne corrélation linéaire entre le total des cations contenus dans les parties aériennes et la CEC ;

— la teneur totale en cations pour une plante est constante selon l'espèce. Seul, le taux individuel de chaque cation peut varier. Celui-ci ne présente qu'une faible relation positive avec la CEC ;

— les anions organiques (oxalate, citrate, malate) présentent une bonne corrélation avec la CEC. Les anions minéraux n'en présentent aucune ;

— l'excès de base (différence entre (1) et (2) du tableau 10) donne une bonne relation linéaire avec la CEC ;

— une bonne corrélation est trouvée entre la somme Fe + Mn et la CEC, de même que Fe + Mn + Cu + Zn ;

— la CEC donne une bonne corrélation avec le contenu de protéines et une corrélation négative avec les fibres cellulosiques.

Concernant les conclusions de CROOKE et KNIGHT, on conçoit la difficulté d'exprimer en méq. des anions de polyacides dont on ne connaît pas le degré de dissociation et cela explique le dit « excès de base » sans parler des autres ions organiques qui interviennent dans l'équilibre acido-basique.

TABLEAU 10

Plantes	CEC méq. 100 MS	En méq. p. 100 g MS		Différence 1 — 2	Fe + Mn en p.p.m. [Fe+Mn+Cu + Zn]
		Somme des cations Ca+Mg +K+Na (1)	Somme des anions P+S+Cl (2)		
Red top	17,3	93	42	51	343 [370]
Pâturin du Kentucky ...	21,6	96	61	55	240 [273]
Full Bloom	22,6	85	48	28	263 [310]
Avoine.....	22,8	73	46	39	200 [247]
Pâturin canadien	24,1	88	30	43	970 [351]
Trèfle blanc	30,2	191	73	118	424
Chou cabus	34,6	116	124	8	126 [164]
Pois	35,0	136	49	87	—
Épinard.....	36,1	325	121	204	784 [887]
Pomme de terre	38,1	358	132	226	—
Luzerne	40,0	215	84	131	—
Chou vert	40,0	264	—	—	—
Céleri	47,2	267	207	60	189
Rutabaga	47,5	159			
Chou fourrager	47,5	241	42	138	426 [479]
Laitue	65,1	236	110	126	1 230 [1 354]

III. — SOLUTION DU SOL, SOL, RACINE

1. *Les ions et la solution du sol*

ELGABALY et WICKLANDER (1949) ont déduit des équations de DONNAN les conclusions suivantes :

— lors de l'adjonction d'ions mono- et bivalents à la solution externe (solution du sol), l'ion bivalent est fixé plus fortement sur le complexe absorbant du sol (solution interne) ;

— la fixation de l'ion bivalent est d'autant plus forte que la solution externe est plus diluée ;

— dans des conditions identiques, le rapport $\frac{\text{ions bivalents}}{\text{ions monovalents}}$ augmente d'autant plus que la capacité d'adsorption de l'échangeur est plus grande ;

— lors du mélange de 2 systèmes macro-ioniques à capacité d'adsorption différente et à même rapport $\frac{\text{ions bivalents}}{\text{ions monovalents}}$ le macro-ion à plus grande capacité d'adsorption cède plus facilement ses ions monovalents et plus difficilement ses ions bivalents à la solution externe que le macro-ion ayant la plus faible capacité d'absorption.

Ces conclusions concordent avec celles émises par MATTSON et ses collaborateurs. On peut remplacer solution externe par solution du sol et macro-ion par un complexe absorbant.

SCHUFFELEN en 1954 estime que l'activité des ions à la surface des racines est d'une importance capitale dans l'absorption. De plus, il établit une formule donnant l'absorption en fonction de l'activité des ions et d'un facteur dépendant de la respiration de la plante, de la perméabilité, etc.

Pour lui, en prenant l'activité physico-chimique pour caractériser l'activité du milieu, l'adsorption est indépendante de la nature du milieu (solution ou suspension du sol). Cependant il avoue l'impossibilité de déterminer exactement l'activité d'ion comme VENEMA (1952) l'avait signalé.

BLANCHET en 1956 étudie l'action de la concentration des solutions nutritives sur la vitesse d'absorption des principaux aliments par les plantes. Il déduit que la vitesse d'absorption augmente fortement avec leur concentration dans le milieu et cela d'autant plus que les besoins de la plante sont importants. Exemple : la vitesse d'absorption du K est 10 fois plus grande à 300 mg de K/litre qu'à 10 mg/litre. Aussi, lorsque les récoltes présentent des besoins intenses devant être satisfaits en période courte (cas des cultures intensives), la solution du sol doit être suffisamment concentrée pour que la vitesse d'absorption soit elle-même suffisante. Cependant il existe des seuils optimums pour ces concentrations.

En 1959, BLANCHET énonce quelques lois de la nutrition minérale en solution pure :

— la concentration des solutions compatibles avec une bonne alimentation des cultures est de 5 à 10 mg/litre ;

— les racines jouent un rôle d'intermédiaire et de tampon entre la solution du sol et les parties aériennes ;

— l'absorption des éléments minéraux à partir des solutions du sol ou de solutions nutritives synthétiques s'effectue contre un gradient de concentration. Le franchissement de ce gradient nécessite de la part de la plante une dépense d'énergie au niveau des racines, provenant de l'oxydation des substances organiques (respiration) ;

— l'absorption des ions minéraux dans le sol est très différente de celle en solution pure. La comparaison montre qu'à concentration égale, l'absorption dans le sol est plus lente (il explique ce fait par des phénomènes de contact racines-particules).

BOULD (1963) rappelle que l'effet de valence d'un ion peut être annulé par

une augmentation de la concentration du cation dans la solution et il retrouve par des effets de dilution ce que SCHUFFELEN (1954) avait montré quant à l'absorption du K et du Mg chez les arbres fruitiers. De plus, l'absorption des cations par des plantes à partir des solutions nutritives n'est pas sujette à une importante compétition concernant les ions nutritifs entre les colloïdes du sol et ceux des racines, comme c'est le cas en substrat sol. C'est là que réside la différence d'alimentation entre une plante en culture extensive et celle en solution hydroponique. Plus la culture est intensive, plus on se rapproche de la culture sans sol ; cela est également vrai en sol sableux pur.

2. *Le sol*

Sans entrer dans le détail de ce facteur, il est cependant important d'en parler brièvement.

Pour MATTSON, le complexe absorbant du sol est constitué d'ampholytes qui qui possèdent des radicaux acidoïdes et des radicaux basoïdes selon la formule générale :

$$H^+ \text{ ——— } (AB) \text{ ——— } OH^-$$

dans laquelle A = fraction acidoïde, B = fraction basoïde. Leur solubilité dans l'eau est tellement faible qu'aucune constante de dissociation n'a pu être déterminée. Mais ils possèdent des propriétés d'échange connues depuis longtemps. Ci-dessous quelques données concernant la CEC de différents substrats :

TABLEAU II

	méq. p. 100 g	
Sols dunaires (culture de bulbe)	3-4	
Sols solodisés (culture d'asperge)	2,5-4	
Sols tourbeux (culture légumière)	45-58	
Sols argilo-calcaires hydromorphes	40-60	
Sols humo-sableux (culture maraîchère sous serre)	16-25	
Terre franche	12	Laboratoire de Chimie E. N. S. H. Versailles
Terre de bruyère	60	
Tourbe de Hollande	92	
Sphagnum	51	
Polypode (racines)	87	
Mélange horticole (sapinette + terreau de chêne)	92	
Mélange horticole (terreau de fumier et de feuille)	40	
Terreau maraîcher pour repiquage	40	
Rendzine riche en humus	40-50	in : DEMOLON Dynamique des sols.
Sol brut forestier	20	
Argile moyenne	60	
Montmorillonite	100	
Illite	30-50	
Kaolinite	10	

Les colloïdes du sol vont donc rivaliser avec les colloïdes racinaires pour l'adsorption des cations. C'est ainsi que ELGABALY et WICKLANDER en 1949 considèrent le système plante-sol comme un système de Donnan à 2 phases colloïdales, la distribution des cations de différentes valences entre les 2 phases dépendant de la CEC de la plante et du minéral argileux. Ainsi, une même plante, tout autre facteur étant égal, prendrait plus de cations monovalents d'une argile à grande CEC que d'une argile à faible CEC.

C'est ainsi que BROWN (1955) vérifie que l'absorption du Ca par une même espèce diminue dans l'ordre suivant : bentonite > illite > kaolinite ; de même, le Ca disponible pour la plante est plus important pour un sol avec kaolinite que pour un sol contenant principalement de l'argile montmorillonitique.

ELGABALY et WICKLANDER (1949) constatent que l'orge adsorbe plus de Ca et de Na à partir de la bentonite (CEC élevée) qu'à partir de la kaolinite (CEC faible) à concentration égale d'argile et avec le même rapport entre les 2 ions.

TEPE (1956) détermine la capacité d'approvisionnement d'un sol en ions nutritifs grâce à des résines échangeuses d'ions et, en rapport avec l'alimentation de la plante, cette capacité de libération d'ions nutritifs dépend de 4 facteurs :

la capacité d'échange du sol,
la teneur en sels du sol,
la teneur en eau,
la température.

TEPE utilise une « unité d'échange » consistant en un boudin à dialyse rempli de résines ioniques contenant en quantité égale H^+ et CO_3H^-. Pour mesurer le pouvoir du sol à libérer des ions nutritifs, il suffit d'enfoncer ce boudin dans le sol à étudier, et cela durant un temps déterminé. Les ions de « l'unité d'échange » ayant diffusé dans le sol et les ions absorbés du sol diffusant dans « l'unité d'échange » jusqu'à équilibre, ces derniers peuvent alors être déterminés analytiquement. Il conclut que ces expériences n'ont pas eu pour but de construire un véritable modèle de racine, mais uniquement de déterminer un pouvoir d'échange, d'approvisionnement du sol en éléments nutritifs. Cela est intéressant, mais malheureusement, la racine n'est pratiquement jamais en équilibre avec le complexe sol, comme nous allons le voir.

3. *Système racine-sol*

a) *Introduction.*

A la théorie classique de l'alimentation des plantes à partir de la solution du sol, s'est ajoutée la théorie des effets de contact racines-particules du sol de JENNY et OVERSTREET admise par de nombreux chercheurs mais qui néanmoins, a suscité un certain nombre d'études contradictoires comme celles de LUNDEGARTH (1942) et LAGERWERFF (1960).

b) *La théorie de contact racines-particules du sol.*

JENNY et OVERSTREET en 1939 dans leurs recherches sur l'alimentation des plantes à l'aide d'ions radioactifs concluent que « toutes les fois que les particules colloïdales argileuses touchent les surfaces racinaires, les cations sont transférés de la plante vers les colloïdes du sol ». Ils expliquent ces phénomènes de contact

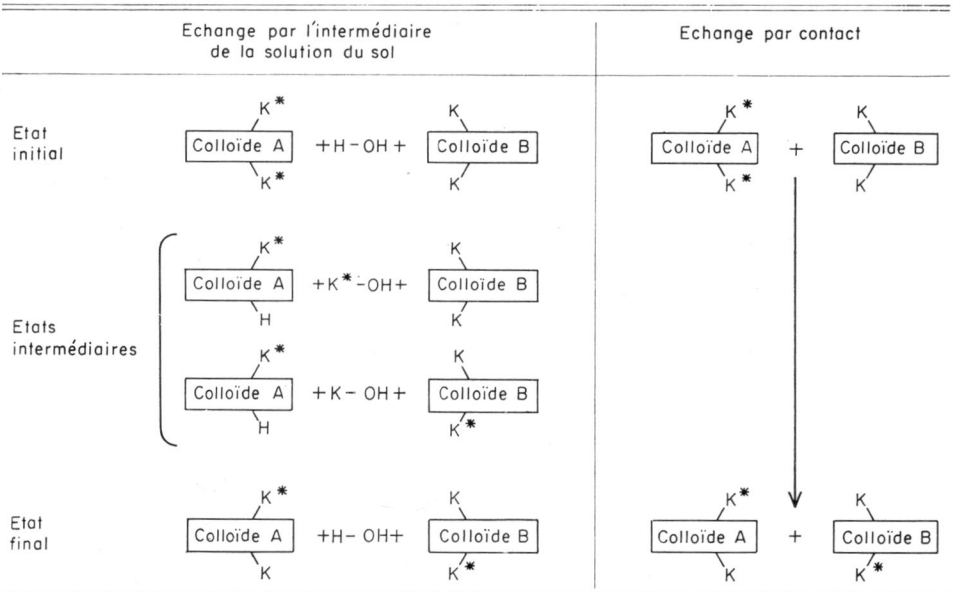
comme étant les résultats de l'échange d'ions entre les doubles couches électriques interpénétrantes, ou plus scientifiquement par le chevauchement des espaces d'oscillations d'ions adsorbés, les ions de la même espèce pouvant se mouvoir dans la racine et hors de la racine dans le même temps.

JENNY en 1951 a schématisé sa théorie selon le tableau 12 ci-dessous.

ELGABALY, JENNY et OVERSTREET (1943) démontrent que l'absorption par contact existe directement entre les racines d'orge et des suspensions argileuses. JENNY dans des travaux publiés en 1960 montre que la croissance de la luzerne dans un milieu à base de grain de quartz recouvert d'oxyde de fer est directement proportionnelle au nombre de sites de contact entre le système radiculaire et les grains de quartz.

Pour LUNDEGARTH (1942), la théorie de JENNY et OVERSTREET est superflue. En effet, il constate que les particules du sol forment rarement une couche continue enveloppant l'extérieur du chevelu racinaire, mais qu'elles sont disposées irrégulièrement laissant des espaces comblés par un film d'eau. Ce film aqueux entre les colloïdes du sol et la surface absorbante des racines est toujours un facteur important dans l'absorption des aliments minéraux par les racines.

TABLEAU 12



Quant à LAGERWERFF (1960), il oppose à la théorie de JENNY un argument d'ordre thermodynamique. D'après lui, il existe un équilibre thermodynamique entre les phases variées du système sol-solution-plante. Dans ces conditions d'équilibre, l'environnement ionique des racines des plantes est entièrement caractérisé par la composition ionique de la phase solution.

MULLER (1963) tente de vérifier le phénomène de contact particules du sol-racines à l'aide de résines échangeuses d'ions. Ses conclusions font apparaître que les phéno-

mènes de contact racines — particules échangeuses d'ions jouent un rôle important dans l'alimentation de la plante. BLANCHET avait également montré l'importance de ce phénomène dans l'alimentation phosphorique des plantes sur sols synthétiques. MULLER conclut que les différences de comportement entre les divers systèmes étaient dues à des vitesses de transfert différentes des ions suivant les systèmes. Cette hypothèse a été confirmée en 1965 par LAGERWERFF.

LUNDEGARTH est suivi dans ses hypothèses par BURD dès 1947. Pour lui, si la solution du sol est vraiment nécessaire dans l'absorption minérale par les racines, une interface entre cette solution et la particule terreuse doit exister. Cette interface serait constituée de molécules d'eau orientées, entourant les ions adsorbés sur les particules. VENEMA en 1952 considère que le système plante-sol se compose de 2 systèmes colloïdaux à solution ionique commune : la solution du sol. CHAUSSIDON en 1963 estime qu'entre le sol et la racine, il y a le film d'eau qui constitue une couche diffuse ionique et il rejette la juxtaposition de 2 systèmes sol-solution et solution-plante mais pour en déduire, comme VENEMA, un seul : sol-solution-plante.

***

L'ensemble de cette première partie de l'étude nous a montré que le sol et les racines sont 2 systèmes colloïdaux qui, par leur réaction de surfaces, déterminent en partie la statique et la dynamique des éléments fertilisants entre ces deux systèmes. En tant que complexe adsorbant, ces deux systèmes sont en lutte perpétuelle pour accaparer les éléments nutritifs ; le but des techniques agronomiques doit être de faire en sorte que cette lutte se détermine en faveur de la plante, sans pour cela affaiblir la capacité de production du sol.

IV. — CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASE DES RACINES ET ALIMENTATION MINÉRALE DES PLANTES

1. *Introduction*

Par l'application de l'équilibre de Donnan aux systèmes racinaires, les différences de valeurs des CEC de plantes diverses ont pu être utilisées par de nombreux auteurs pour expliquer les absorptions préférentielles soit de K (DRAKE, 1951), soit de Ca et K (SMITH, 1956), de Sr (MOUAT, 1960) et P (DRAKE, 1955) par diverses espèces végétales.

Ainsi, MEHLICH et DRAKE (1955) émettent le point de vue selon lequel la CEC des racines est en relation intime avec l'accumulation des ions et que les différences interspécifiques dans les quantités d'ions retenus par les plantes proviennent des CEC différentes des racines de ces mêmes plantes.

COLEMAN (1958), à la suite d'expériences sur la CEC des racines, montre que celle-ci peut avoir *plus* ou *moins* d'incidence sur l'absorption des cations ; cependant, dans sa conclusion, il reconnaît que la CEC peut être d'une grande importance dans la nutrition minérale des plantes.

EPSTEIN (1956) et LATIES (1959) doutent de la signification de la CEC des racines

dans la nutrition minérale des plantes ; de même, BLACK en 1957, affirme que les propriétés d'échange de cations des racines apparaissent jouer un rôle non essentiel dans l'absorption des ions.

Par contre, ASHER et OZANNE (1961) pensent que la CEC des racines peut exercer une influence quantitative sur la nutrition dans un milieu de basse activité ionique, par l'augmentation de la concentration en cations de la racine par rapport à celle de la solution aqueuse environnante et la fixation de la proportion relative d'ions de valences différentes dans la racine.

Quant à BROWN (1963), il estime que trop de preuves existent montrant les interactions des colloïdes du sol, de la CEC des racines et des éléments nutritifs pour rejeter l'influence de cette CEC dans l'alimentation des plantes.

2. *Absorption des ions par les racines*

Cette absorption est prise dans le sens général que les auteurs lui accordent, c'est-à-dire qu'elle comprend l'adsorption et l'absorption proprement dite des ions.

Dans une étude concernant le mécanisme d'absorption des cations du sol par les plantes, OVERSTREET et BROYER (1942) trouvent une relation entre le dégagement d'acide carbonique par les racines et l'absorption des cations provenant de suspensions argileuses. En effet, la dissociation de cet acide libère un certain nombre d'H^+ qui, par échange au niveau des surfaces des argiles, déterminent le passage dans la solution du sol des cations adsorbés et donc pouvant être assimilables par les plantes. Cependant, comme le fait remarquer Mme BLANC (1955), cette théorie carbonique de l'alimentation n'implique qu'un mouvement unilatéral des cations depuis le sol jusqu'aux racines. Donc cette théorie ne peut convenir aux expériences de JENNY (1939) qui observe que les racines peuvent céder des cations quand elles sont au contact des particules argileuses colloïdales et à celles d'ELGABALY et de JENNY qui prouvent que l'absorption directe par contact existe.

MATTSON (1948), dans ses études sur l'alimentation minérale des plantes et sur les équilibres de Donnan, conclut que, pour une plante donnée, la prise d'aliments dépend beaucoup plus de sa membrane racinaire donc de sa CEC que de la composition du milieu nutritif environnant.

MEHLICH et COLEMAN (1952) expliquent à leur tour l'absorption des cations grâce à la production d'acide carbonique des racines des plantes et estiment qu'il doit exister une relation entre le CO_2 ainsi dégagé, la CEC et l'absorption elle-même.

EPSTEIN et HAGEN (1952) pensent que l'absorption des métaux alcalins peut s'expliquer par la formation et la rupture d'un complexe intermédiaire MR, de l'ion métallique M avec un produit obligatoire du métabolisme R, par analogie avec les réactions enzymatiques. De plus, ils émettent l'hypothèse de l'existence, sur les racines, de plusieurs sites distincts de liaisons quant aux ions qu'ils fixeraient. Ainsi ils expliquent les interférences compétitives dans l'absorption entre K-Rb-Cs par le fait qu'ils occuperaient les mêmes sites, et la compétition nulle du Na et Li par le fait qu'ils occuperaient des sites différents.

VENEMA (1952) rejette la conception d'ELGABALY et WICKLANDER (1949) selon laquelle le système sol-plante représente un système de Donnan à 2 phases colloïdales, car l'équilibre d'un tel système se produit sans apport extérieur de travail, alors que l'*absorption des ions par le système colloïdal du végétal nécessite un apport assez important*

de travail. De plus, ELGABALY utilise les activités des solutions ioniques qui ne sont exactes que pour des solutions très diluées ; aussi les conclusions déduites sont-elles d'autant plus approximatives que le sol en question est plus riche en éléments nutritifs ou que la dose d'engrais est plus grande.

Cependant, dans la pratique, les conclusions d'ELGABALY et WICKLANDER permettent des déductions très intéressantes et peuvent se résumer ainsi :

1. La répartition relative des cations mono - et bivalents est déterminée par la capacité d'absorption des 2 phases solides, c'est-à-dire par la capacité d'absorption du sol et par celle du système racinaire des plantes.

2. Toutes conditions par ailleurs identiques, une espèce végétale déterminée absorbera proportionnellement plus d'ions monovalents et moins d'ions bivalents si la capacité d'absorption du complexe du sol augmente.

3. Lors du mélange de 2 sols à CEC différentes, le rapport Ca/Na augmente dans le végétal, quand la proportion du sol à faible CEC augmente.

4. Les autres conditions étant identiques dans des sols de composition différente mais ayant la même capacité d'absorption, une espèce végétale absorbera les cations de telle manière que la composition chimique de la plante reflètera la composition ionique du complexe du sol.

5. De 2 espèces végétales à teneurs différentes en acidoïdes, donc à CEC différentes (racines), ce sera l'espèce ayant la plus forte teneur en acidoïdes qui absorbera à partir du même sol plus de cations bivalents et moins de cations monovalents.

6. Si, pour une raison quelconque, l'activité d'un cation change dans la solution, l'absorption de ce cation par la plante variera corrélativement.

SCHUFFELEN en 1954 constate que l'absorption des ions par les plantes se traduit par une accumulation et donc nécessite un apport d'énergie, qui sera fourni par la respiration de la plante. Cette absorption dépend non seulement des ions disponibles dans le milieu, mais aussi de la teneur ionique de la plante. Il appelle cette phase d'accumulation « la phase morte », dont le siège principal se trouve sur la paroi radiculaire.

Pour lui, comme pour EPSTEIN, l'absence ou la présence de points spécifiques d'adsorption et de substances de support sur la paroi radiculaire constitue un problème important dans l'absorption minérale.

WICKLANDER et ELGABALY en 1955 insistent sur le fait que l'activité des ions dans le système sol-plante joue un rôle important dans l'alimentation des plantes, indépendamment du mécanisme responsable de la prise des ions à partir du milieu environnant.

BLANCHET en 1959, comme d'ailleurs SCHUFFELEN dès 1954, estiment que pour obtenir la désorption des ions minéraux absorbés sur les colloïdes du sol, la plante doit fournir un travail correspondant à la rupture de ces liaisons. Cette source d'énergie est l'oxydation respiratoire. BLANCHET a même calculé que la dépense énergétique ne représente que 1/10 000 du stock de glucides pour 1 ha de cultures à 5-10 T de MS, et donc ne limite pas la croissance.

WIERSUM et BAKEMA en 1959, ayant trouvé que la CEC d'une plante varie avec la composition du milieu, estiment qu'elle joue un rôle de régulation dans l'alimentation des plantes en fonction du dit milieu et qu'elle est bien un des principaux facteurs gouvernant cette prise d'ions.

Quant à RAINS (1964), dans une étude sur l'absorption des cations par les racines, il montre que les ions H^+ ont deux effets distincts sur cette absorption, suivant la présence ou l'absence d'ions Ca^{++} dans le milieu.

Enfin les recherches de BREAZEALE et MCGEORGE en 1955 sur la signification du phénomène électrique dans les tissus des plantes permettent de les relier à l'absorption des ions par les racines. Ainsi, des voltages de 2,1 — 2,13 — 2,20 — 2,23 sont spécifiques pour une absorption maximum respective de Na, K, Ca et Mg. L'absorption correspond donc à un travail au sens thermodynamique.

Les travaux de BIRKLE et *al.* en 1965 démontrent l'influence de l'oxygène dans les zones de la rhizosphère sur l'absorption des ions, par exemple :

Na est fortement absorbé, si la concentration en O_2 est faible.

K, N, P sont fortement absorbés, si la concentration en O_2 est forte.

Ces constatations mériteraient une étude sur diverses espèces afin de pouvoir être confirmées.

En conclusion des études sur l'absorption des cations du sol par les racines des plantes, EPSTEIN et LEGGET en 1954, comme BOULD en 1963, déduisent qu'elle se fait en deux phases :

1. Il y a une réaction physique d'après EPSTEIN, au cours de laquelle la racine agit par échange de cations. C'est le phénomène physico-chimique ou adsorption de BOULD qui n'a rien à voir avec le métabolisme de la plante. C'est un procédé d'échange des ions H^+ obtenus par la respiration avec les cations du milieu nutritif. Cette fixation d'après EPSTEIN est réversible et indépendante du facteur température (contrairement à la 2e phase).

2. La 2e phase consiste en un transport actif dépendant des processus métaboliques. Ces phénomènes sont irréversibles, hautement sélectifs et sous la dépendance de la température. C'est au cours de cette phase, appelée « passage actif des ions », qu'EPSTEIN introduit sa théorie des sites d'adsorption reprise par BOULD, en précisant que leur nature est loin d'être connue, malgré les nombreuses hypothèses tendant à les considérer comme des composés azotés de haute énergie comme ceux intervenant dans les phénomènes de phosphorylation (du type ribonucléoprotéide).

Enfin, BROWN en 1963 conclut son travail sur l'absorption des ions du sol par les racines des plantes en pensant que, vu le nombre d'inconnues, seules des recherches simultanées de physiologie, de biochimie et d'agrochimie, pourront permettre d'avancer dans le mécanisme très complexe qu'est cette absorption.

3. *Excrétion des ions par les racines*

Dès avant-guerre, JENNY et OVERSTREET (1939) avaient démontré l'excrétion de cations à partir des racines. SCHEFFER (1955) et COÏC (1963) constatent que la force de succion diminue avec l'âge de la plante et, par exemple, pour les céréales peu avant leur maturité, on arrive au phénomène inverse par lequel la plante restitue au sol une certaine quantité d'éléments nutritifs. Cela proviendrait d'une réduction de l'intensité respiratoire. Ainsi, pour K, chez les céréales, elle atteint 20 p. 100 de l'absorption maxima. *Les processus d'échange sur la surface racinaire sont donc réversibles.*

4. *Exemples d'alimentation en rapport avec la CEC*

a) *Alimentation calcique et potassique.*

Dans son étude sur les lois d'échange ionique, MATTSON en 1948 affirme que :

— lorsque l'activité des ions K est la même dans le sol et les racines, celle des ions Ca semble être la même dans les 2 phases. L'absorption d'ions par les plantes peut s'effectuer dans la même proportion que celle dans le sol ;

— quand l'activité des cations est plus grande dans le sol que dans les racines, l'absorption relative d'ions K pourra être plus grande ;

— dans tous les cas, l'absorption relative d'ions Ca^{++} par les plantes pourra être plus importante dans un sol à basse CEC alors que l'absorption relative d'ions K pourra être plus grande dans les sols à haute CEC.

SMITH et WALLACE en 1956 déduisent de leurs études sur l'alimentation calcique et potassique des espèces végétales, la relation suivante :

$$\frac{CEC_1}{CEC_2} = \sqrt[2]{\frac{[Ca_1]}{[Ca_2]}} = \frac{[K_1]}{[K_2]}$$

CEC_1 = capacité d'échange de cation du système 1, par ex. le sol.
CEC_2 = capacité d'échange de base du système 2, par ex. le système radiculaire.

Quant à BLANCHET (1956), étudiant l'alimentation du blé, il constate une absorption préférentielle de K par rapport à Ca et à Mg. Or, comme les sols renferment à l'état échangeable beaucoup plus de Ca que de K, il conclut que c'est grâce à cette absorption préférentielle que les plantes sont susceptibles d'absorber autant et souvent plus de K que de Ca.

Enfin, MORITA et AOKI en 1960 concluent à partir d'expériences sur l'adsorption des cations que pour des concentrations identiques de Ca et de K dans le milieu de culture, l'adsorption relative du Ca diminue avec la CEC. Par contre, l'adsorption du K augmente plus légèrement que celle du Ca avec la CEC.

b) *Alimentation calcique.*

DUNHAM (1956), de ses recherches sur la CEC des racines de plantes ornementales, estime que si les plantes se trouvent en consommation de luxe, l'absorption du Ca n'est pas en relation avec la CEC. Seules des conditions de faibles activités ioniques font que la CEC devient un facteur important pour cette absorption.

C'est ce que ASHER et OZANNE vérifient en 1961, lorsqu'ils constatent qu'en milieu à faible activité ionique, l'absorption du Ca augmente avec l'accroissement de la CEC des racines. Ils établissent l'équation de régression suivante entre la teneur en Ca p. 100 MS des parties aériennes des plantes et la CEC des racines (fig. 2).

Mme BLANC-AICARD (1955), dans son étude sur la capacité de saturation en Ca des porte-greffes de vigne et leur résistance à la chlorose calcique, conclut que la résistance à la chlorose calcaire est en rapport avec la capacité de saturation en Ca des racines des divers porte-greffes. Avec de faibles taux de saturation, comme par exemple le *41 B* (*Vitis vinifera* × *Vitis berlandieri*) la résistance est élevée : la CEC du *41 B* est d'environ 16 méq. pour 100 g MS et ce porte-greffe tolère environ

40 p. 100 de « calcaire actif ». Par contre, ceux à capacité de saturation élevée sont très sensibles. Ainsi, le *V. riparia Gloire de Montpellier* dont la CEC est proche de 30 méq. pour 100 g MS, ne tolère pratiquement pas de calcaire actif.

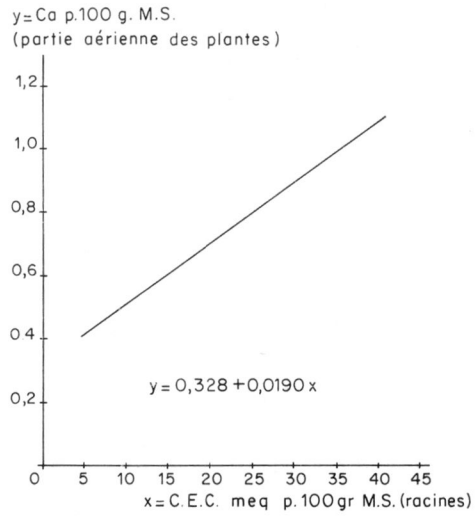


FIG. 2.

c) *Alimentation potassique.*

Celle-ci a été surtout étudiée pour les associations prairiales légumineuses-graminées de CEC très différentes. Ainsi DRAKE, VENGRIS et COLBY en 1951, GRAY en 1953, COÏC en 1957, YORK en 1957, DROUINEAU en 1957, HAUSSMANN en 1957, VAN DEN HENDE en 1957, MOUAT et WALKER en 1959 et DONALD en 1963 en font état dans leurs travaux.

Tous s'accordent à conclure que les différences d'absorption en K par cette association prairiale proviennent de leurs CEC très différentes : les légumineuses, à CEC élevée, semblent avoir plus de difficulté que les graminées, à faible CEC, à absorber le K (tableau 13) et cela que l'on soit en milieu riche ou pauvre

TABLEAU 13

Relations entre le CEC de trois graminées, l'absorption du K et la compétition avec le trèfle (GRAY, 1953)

Graminées	CEC des racines méq./100 g MS	Absorption relative du K par les graminées en culture pure	Absorption relative du K dans les solutions		Rendement du trèfle en mélange (en g)
			graminées	trèfle	
Agrostis	16	100	100	14	2,68
Pâturin du Kentucky	21	72	40	27	4,67
Brome glabre	24	27	26	38	4,85

en cet élément, selon Coïc. Pourtant, d'après Haussmann (1957) une forte dose d'engrais K permet de diminuer cet effet en remontant le niveau ionique de la solution du sol. Drake et York sont du même avis. De plus, Coïc souligne que, pour réaliser leur croissance optimum, les légumineuses ont besoin, dans leurs tissus d'une concentration plus forte de K que les graminées. On voit donc que, pratiquement, le K est le facteur intervenant fortement sur la compétition légumineuses-graminées des prairies et donc dans la dégradation d'un tel tapis végétal.

Venema en 1952 étudie l'intérêt théorique des fumures K dans les cultures de plusieurs plantes et aboutit, par des expériences culturales, aux conclusions suivantes :

La pomme de terre, avec une CEC de 38 méq, a une assez mauvaise capacité d'absorption pour le K, donc une fumure s'imposera, d'autant plus que le sol qui porte la culture sera léger (faible CEC). Il conclut que l'absorption du K^+ en rapport avec les valeurs de la CEC du sol est inversement proportionnelle à la CEC des racines, comme le montrent les chiffres ci-après de Drake (tableau 14).

TABLEAU 14

Plantes	CEC méq./100 g MS (racine)	méq. de K^+ dans	
		le sol	la plante
Avoine	22,8	100	50
Seigle	12,3	100	90
Blé	9,0	100	155

Enfin, pour Venema, comme l'absorption des ions par les plantes est un phénomène non pas sélectif mais électif, on peut alors forcer la plante, par la fumure apportée, à modifier ses rapports d'ions (cations ou anions) mono - et bivalents.

Fawzy et Overstreet en 1954 constatent qu'à des pH de la solution nutritive inférieurs à 4,5, les racines perdent du K^+, mais que l'adjonction de Ca^{++} en petite quantité produit un effet stimulant la réabsorption du K. Ainsi, il y a un effet des cations polyvalents sur les monovalents en relation avec la concentration en H^+.

En outre, Mme Blanc, McLean ont trouvé que la fumure azotée augmentait la CEC des graminées et modifiait indirectement l'absorption du K.

Enfin, en 1962, Blanchet, au sujet de l'alimentation K des plantes, considère que celle-ci est fonction de plusieurs facteurs dont le développement des systèmes radiculaires et notamment de leurs surfaces absorbantes exprimées par la CEC. Le partage des ions K^+ entre la plante et le sol dépend du degré d'exploitation de celui-ci par les racines et du nombre d'ions K^+ présents dans un élément de volume donné entourant les radicelles. C'est le facteur essentiel dans l'alimentation potassique.

d) *Alimentation azotée.*

Gouny en 1955 et Coïc en 1963 estiment que la fourniture de l'azote aux plantes soit à l'état ammoniacal, soit à l'état nitrique entraîne des modifications dans la solution du sol. NH_4 prend une importance prépondérante sur les autres cations et pénètre en plus grande quantité dans la plante. C'est ce que Coïc vérifia lorsqu'il fit passer

une plante de l'alimentation nitrique à l'alimentation ammoniacale et qu'il constata alors une excrétion cationique plus importante pour Na puis pour K et pour Ca. Il explique ceci en disant que ce passage à l'une ou l'autre forme modifie la composition acido-basique de la plante et donc son équilibre minéral.

e) *Alimentation phosphatée.*

MOUAT et WALKER en 1959 concluaient que la base de la compétition pour P_2O_5 entre les plantes était fonction de la CEC des racines.

ASHER et OZANNE en 1961 estiment que les plantes à haute CEC sont plus aptes que celles à faible CEC à absorber le P des phosphates naturels, car elles déplacent plus facilement les cations divalents associés au phosphate et rendent celui-ci plus assimilable par les plantes (fig. 3).

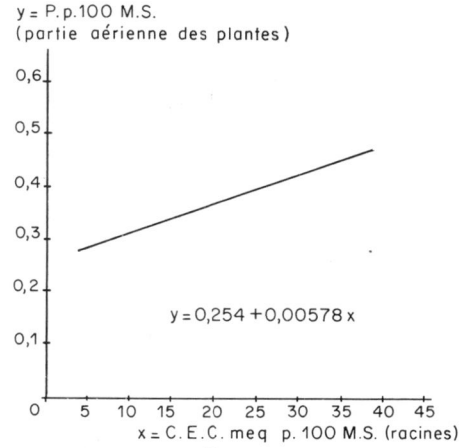


FIG. 3.

MALQUORI en 1964 est du même avis, et ajoute qu'indirectement, N engendre une augmentation de la CEC, favorisant donc l'assimilabilité du P des phosphates naturels tout en diminuant l'absorption du K par suite de l'antagonisme ionique K-Ca.

TABLEAU 15

Espèce	CEC des racines méq/100 g	Prélèvement en méq. de P_2O_5 par pot
Blé	9	2,95
Chénopode	25	8,89
Renouée	41	13,71
Armoise	59	18,76

f) *Alimentation en autres éléments.*

Enfin, concernant d'autres cations, VOSE et RANDALL en 1962 estime que la CEC des racines peut expliquer en partie la résistance des plantes aux doses toxiques d'Al^{+++} et Mn^{++}.

Les graminées à CEC faible sont plus résistantes que les légumineuses à CEC plus élevée.

ELGABALY en 1962, dans son étude sur l'effet de la CEC dans l'absorption des anions, constate que, plus la CEC de la paroi racinaire augmente, plus elle devient négative et absorbera donc moins d'anions.

TABLEAU 16

Variété de Ray-grass	CEC en méq. pour 100 g de MS (racines)
Danoise sensible à Al^{+++}	23,0
3 A 7486 moyennement résistante.....	18,5
3 A 7485 résistante à Al^{+++}	14,9
Danoise sensible à Mn^{++}	23,0
3 A 8200 résistante à Mn^{++}.....	16,2

De plus, la valence du cation accompagnateur agit sur l'absorption de l'anion et, par exemple, l'absorption de Cl^- augmente avec la valence du cation associé (cation trivalent > divalent > monovalent), le cation ayant en effet une action variable selon sa valence sur le potentiel négatif de la surface racinaire : (tabl. 17).

TABLEAU 17

Racines	CEC méq./100 g	Absorption de Cl^- en méq./100 g MS		
		$CaCl_2$	NaCl	résine Cl
Orge	12	9,79	9,22	8,99
Luzerne	45	2,55	2,03	13,63
Pois	53	1,93	—	—
Soja	65	0,74	0,28	11,25

5° *Conclusions*

Concernant l'alimentation minérale des plantes, on peut conclure que la capacité d'échange de base des systèmes racinaires joue un rôle important et d'autant plus que les sols sont pauvres en éléments nutritifs solubles. De ce fait, comme le soulignait déjà DUNHAM en 1956 à partir de ses résultats obtenus sur les plantes ornementales, la CEC des systèmes radiculaires n'intervient vraiment qu'en culture extensive, son incidence étant réduite pour les cultures de plantes en serre où la solution du sol est à un niveau nutritif très élevé. De plus, les résultats obtenus expérimentalement avec des solutions nutritives de très faibles concentrations ne sont extrapolables aux cultures extensives qu'avec beaucoup de prudence, car le sol est un système plus complexe qu'une simple solution nutritive comme nous l'avons vu.

Enfin et surtout, les résultats resteront arbitraires et souvent contradictoires aussi longtemps que les valeurs de la CEC seront rapportées à un poids de système radiculaire et non à une surface de système radiculaire, car comme il s'agit de phénomènes interfaciaux, c'est l'interface qui décide et non pas un poids de matière sèche. Nos recherches s'effectuent dans cette voie car la voie précédente ne nous a pas permis de présenter des résultats probants des particularités que nous tentons de démontrer.

En outre, comme l'a montré SALSAC en 1966, l'absorption du Ca^{++} par les racines excisées de Lupin et de Féverole apparaît comme un phénomène essentiellement passif mais différent d'une simple diffusion. La courbe d'absorption se décompose en deux droites ce qui correspond donc à 2 phases dans le phénomène d'absorption. On peut donc se demander si la technique des racines excisées reflète la réalité concernant l'absorption racinaire et aussi concernant la CEC déterminée précisément sur des racines excisées.

V. — CONCLUSION

La majorité des études que nous venons d'examiner concernant l'alimentation minérale des plantes en fonction de la CEC du système radiculaire, n'envisage le phénomène que du point de vue statique, alors qu'il possède un caractère dynamique.

Ainsi BLANCHET en 1962, estime que ce caractère dynamique joue un rôle primordial dans l'alimentation minérale des plantes, alors que le rapport entre les capacités d'échange des deux adsorbants (colloïdes du sol et colloïdes racinaires) considéré par de nombreux auteurs comme principal responsable de l'alimentation, voit son rôle diminuer.

Mais c'est à CHAUSSIDON en 1963 que revient le mérite d'avoir insisté sur le caractère dynamique de l'alimentation minérale. Selon cet auteur, « la couche située entre l'argile et la racine est évidemment unique et il faut imaginer dans ce volume l'établissement de 2 couches diffuses qui se chevauchent en interréagissant. Cette interaction se caractérise par un niveau énergétique minimum correspondant à un état de grande stabilité. Tout se passe comme si, lors de l'alimentation de la plante, les ions avaient à franchir une barrière de potentiel. Malgré tout, cela repose sur la théorie de GOUY-CHAPMAN des couches diffuses ioniques, théorie qui stipule que les systèmes décrits sont pris dans un état d'équilibre réversible. Or, même en tenant compte des excrétions des plantes dans le milieu qui les supporte, il n'en reste pas moins que le végétal exporte une certaine quantité de substances minérales hors du substrat. »

Or, comme le précise CHAUSSIDON, la thermodynamique des flux où l'on a des processus irréversibles concerne précisément de tels systèmes. Malheureusement l'application expérimentale de ces dernières données théoriques étant encore peu poussée, tout le problème concernant les aspects de l'effet de contact entre particules colloïdales et racines est encore loin d'être élucidé. Des études micromorphologiques de la racine devront en particulier préciser le nombre de pores par unité de surface, l'efficacité de ces pores, etc.

Cependant, on peut espérer par la synthèse entre les études statiques qui sont les études d'équilibres relativement réversibles et celles, dynamiques, où la réversibilité

n'est plus valable, qu'on arrivera à mieux interpréter l'alimentation de la plante et à la favoriser, ce qui est le but de l'agronome. Mais une des bases de cette synthèse future est précisément l'étude approfondie de la statique, en somme, celle de la CEC qui a fait l'objet de cette mise au point bibliographique.

Reçu pour publication en janvier 1967.

SUMMARY

CATION-EXCHANGE CAPACITY OF ROOT SYSTEMS AND SOILS,
AND RELATIONSHIP WITH MINERAL FEEDING OF PLANTS

This study is chiefly bibliographical in character. Feeding of the plant results from the interaction of two antagonistic colloidal systems, i.e., the root and the soil colloids. First the cation-exchange capacity of both root and soil are gone into, and then the resulting interaction thereof.

After briefly outlining the work performed relating to the cation-exchange capacity of roots, origination of the phenomenon and the analytical determinations are set forth. Then the factors affecting the aforesaid capacity of roots are discussed : pectic content of the roots, nitrogenous feeding, cultural environment, species and varieties cultivated, age of the plant, chemicals (heavy metals especially).

The relations soil/soil solution/roots are then tackled on the basis of the relevant literature.

In the third section, the relations existing between the cation-exchange capacity of roots and feeding of plants are then dealt with in general, and then the former characteristic in connection with more specific feeding, which may be calcic, potassic, nitrogenous, phosphatic or may consist of other elements.

This bibliographical study shows that, heretofore, in spite of the research work carried out relating to reversible phenomena, the soil/plant relationship problems are far from being cleared up. Even in the merely static study of the cation-exchange phenomenon, there are many gaps in our knowledge. The feeding of plants, a dynamic phenomenon, has only been considered, so far, from the static standpoint : that is why some recent studies have had recourse to the thermodynamics of flow so as to grasp better the dynamics of the problem.

ZUSAMMENFASSUNG

KATIONENUMTAUSCH KAPAZITÄT VON WURZELSYSTEMEN UND BÖDEN,
UND IHRE EINWIRKUNG AUF DIE MINERAL ERNÄHRUNG

Diese Untersuchung ist vorwiegend bibliographischer Natur. Da die Ernährung der Pflanze von zwei entgegenwirkenden Kolloïdsystemen abhengt : die Wurzelkolloïde einerseits und die Bodenkolloïde andererseits, untersuchen die Verfasser zunächst die Kationenumtausch Kapazität der Wurzel, dann des Bodens und schliesslich die gegenseitigen Einwirkungen.

Der historische Werdegang der Arbeiten über die Kationenumtausch Kapazität (K. U. K.) der Wurzel wird erläutert und ihre Ursache, sowie die analytischen Bestimmungen diskutiert. Hierauf, werden die Faktoren, die die K. U. K. der Wurzel beeinflussen, untersucht : Pektingehalt der Wurzeln, Stickstoff Ernährung, Natur des Substrats, angebaute Arten und Sorten, Alter der Pflanze, chemische Stoffe insbesondere Schwermetalle.

Die Beziehungen : Boden-Bodenlösung-Wurzeln werden dann, unter Bezugnahme auf die zu diesem Thema entwickelten Theorien, erörtert.

Im dritten Teil, untersuchen die Verfasser die bestehenden Beziehungen zwischen der K. U. K. der Wurzeln und die Ernährung der Pflanze im allgemeinen, dann zwischen dieser Charakteristik und mehr speziellen Ernährungen (Kalk — Kalium — Stickstoff — Phosphor — andere Ernährungen).

Diese bibliographische Untersuchung zeigt, dass, bis jetzt eine föllige Aufklärung der Wechselbezichungen zwischen Boden und Pflanze noch nicht vorsteht. Selbst in der statischen

Untersuchung des Prozesses des Kationenumtausches, werden einige Lücken festgestellt, die unsere gegenwärtigen Kenntnisse noch nicht im Stande sind auszufüllen. Die Ernährung der Pflanze ist ein dynamischer Prozess, welcher bis jetst nach statischen Gesichtspunkten behandelt wurde : dies ist der Grund, weshalb sich einige der kürzlich durchgeführten Untersuchungen an die Ström ungsthermodynamik wenden mit dem Ziel die Dynamik des Prozesses zu erfassen.

РЕЗЮМЭ

Катионнообменная способность корневых систем и почв и зависимость от минерального питания.

А. ФРЕЖА, А. АНСЭТТ, Ф. ЛЕМЭР.

Данная работа носит библиографический характер. В виду того что питание растений является следствием взаимодействия двух систем-антагонистов : коллоиды корневой системы — коллоиды почв, авторы рассматривают последовательно катионнообменную способность корневой системы, ту-же способность почв и, наконец, взаимодействие обоих.

После краткого исторического обзора работ посвященных катионнообменной способности корней, авторы напоминают происхождение и аналитические определения этого явления, останавливаясь более подробно на влияющих на него факторах : содержании пектинов в корнях, азотном питании растений, среде их произростания, видах и сортах сельскохозяйственных растений, и химических веществах, особенно тяжелых металлах.

Взаимоотношения почва — почвенный раствор — корневая система разбираются затем с точки зрения различных теорий выдвинутых по этому вопросу.

Третья часть труда посвящена анализу отношений существующих между катионно-обменной способностью корней и питанием растений вообще, или более определенными формами питания (кальциевое, калийное, азотное, фосфорное и.т.д.).

Проведенное библиографическое изучение показывает что несмотря на интерес проявляющийся к вопросу возвратных явлений, отношения почва — растение еще до сих пор не выяснены как следует. Даже в статическом изучении феномена обмена катионами можно отметить некоторые пробелы далеко еще не заполненные современными познаниями. Питание растений — явление динамического характера до сих пор рассматривалось с точки зрения статической и это об'ясняет тот факт, что некоторые из недавно проведенных работ по этому вопросу прибегают к помщи теории термодинамики притока, чтобы раз'яснить динамику этого процесса.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASHER C. J., OZANNE P. G., 1961. The cation exchange capacity of plant roots and its relationship to the uptake of insoluble nutrients. *Austral. J. agric. res.*, **12** (5), 755-66.

BARTLETT R. J., 1961. Iron oxidation proximate to plants roots. *Soil Sci.*, **92**, 372-379.

BERSIN Th., 1950. In SCHEFFER-WELTE, *Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde*, p. 192.

BIRKLE D. E., LETEY J., COLEMAN N. T., RICHARDSON W. F., 1965. Uptake by plants of Cs 137, Ce 144 and Y 91 as influence by rhyzosphere oxygen treatments. *Soil Sci.*, **99**, 93-97.

BLANCHET R., 1956. Absorption préférentielle des cations et rôle des cations dans l'utilisation des anions absorbés. *VIe Congr. internation. Sci. Sol, Paris*, IV, 19.

BLANCHET R., 1959. Énergies d'absorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes. *Ann. agron.*, **1**, 5-52 ; **2**, 125-154.

BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1962. Propriétés physico-chimiques des sols et alimentation potassique des plantes. *Ann. agron.*, **13**, 3, 175-201.

BLANC-AICARD D., 1955. Étude préliminaire sur l'adsorption radiculaire des cations. *Ann. agron.*, **4**, 615-633.

BLANC-AICARD D., DROUINEAU G., 1955. Capacité de saturation en Ca des portegreffes de vigne et résistance à la chlorose calcaire. *C. R. Acad. sci.*, **241**, 1614-16.

BLANC-AICARD D., 1958. Influence de la nutrition azotée sur les propriétés d'échange des racines. *C. R. Acad. sci.*, 246-2035-2037.

BOULD G., 1963. Cation exchange properties of roots nutrition of plants in soils. *Plant Physiol.*, **3**, 61-65.

BREAZEALE E. L., MCGEORGE W., 1955. Specificity of voltage potentials in cation uptake by plants. *Soil sci.*, **80**, 2, 319-324.

BROWN D. A., NOGGLE J., 1955. Ion exchange in soil-plant root environments : 1. Measurement of suites of cations at stages of nutrient uptake : 2. Effect of type clay mineral upon nutrient uptake by plants. *Soil sci. Soc. Amer. Proc.*, **19**, 131-134 ; 296-300.

BROWN J. C., 1963. Interactions involving nutrient elements. *Annu. Rev. Plant. Physiol.*, 93-104.

BROYER T. C., OVERSTREET R., 1940. Cation exchange capacity in plant roots in relation to metabolic factors. *Amer. J. Bot.*, **27**, 425-430.

BURD J. S., 1947, Mechanisms of release of ions from soil particles to plants. *Soil Sci.*, **64**, 223-225.

BURSTRÖM H., 1951. Mineralstoffwechsel. *Fortsch. Bot.*, **13**, 250.

CAHOON G. A., CRUMMET D. O., 1955. The potassium nutrition of stocks *Matthiola incana*. *Amer. Soc. hortic. Sci.*, **66**, 364-373.

CHAUSSIDON J., 1963. Rappel de quelques principes de physico-chimie appliqués à l'ensemble sol-solution-plante. *Bull. Soc. fr. Physiol. vég.*, **9** (4), 220.

COÏC Y., 1957. Sur la nutrition potassique des plantes de prairies après fauchage et pâturage. *Potassium Symposium*, 151-162.

COÏC Y., 1963. Excrétion d'ions minéraux. *Ann. Physiol. vég.*, **5**, 263-276.

COLEMAN N. T., KAMPRATH E. J., WEED S. B., 1958. Liming. Plant characteristics influence absorption of Ca and Mg. *Adv. agron.*, **10**, 500-502.

CROOKE W. M., 1958. Effect of heavy-toxicity metal on the cation exchange capacity of plant roots. *Soil Sci.*, **86**, 231-240.

CROOKE W. M., KNIGHT A. H., MAC DONALD I. R., 1960. Cation exchange capacity and pectin gradients in leek root segments. *Plant and Soil*, **13**, 123-127.

CROOKE W. M., KNIGHT A. H., 1962. An evaluation of published data on the mineral composition in the light of the cation exchange capacity of their roots. *Soil Sci.*, **93**, 365-373.

DEVAUX H., 1916. Action rapide des solutions salines sur les plantes vivantes. *C. R. Acad. Sci.*, **162**, 561-563.

DONALD C. M., 1963. Competition among crop and pasture plants. *Adv. agron.*, **15**, 1-118.

DRAKE M., VENGRIS J., COLBY W. G., 1951. Cation exchange capacity of plant roots. *Soil Sci.*, **72**, 139-148.

DRAKE M., CAMPBELL J. D., 1956. Cation exchange capacity of plant roots as related to plant nutrition. *Proc. Amer. Soc. hortic.*, **67**, 563-569.

DROUINEAU G., 1957. La fumure potassique des herbages dans la région méditerranéenne. *Potassium Symposium*, 223-239.

DROUINEAU G., 1963. La chlorose calcaire. *Bull. Soc. fr. Physiol. vég.*, **9** (4), 151-164.

DUNHAM C. W., 1956. Cation exchange properties of the roots of some ornemental plant species. *Proc. Amer. Soc. hortic.*, **68**, 556-563.

ELGABALY M. M., JENNY H., OVERSTREET R., 1943. Effect of type of clay mineral on the uptake of Zn and K by barley roots. *Soil Sci.*, **55**, 257-263.

ELGABALY M. M., WICKLANDER L., 1949. Effect of exchange capacity of clay mineral and acidoid content of plant on uptake of Na and Ca by excised barley and pea roots. *Soil Sci.*, **67**, 419-424.

ELGABALY M. M., WICKLANDER L., 1949. Donnan equilibria on plant nutrition. Effect of exchange capacity of clay mineral on the uptake of Na and Ca by excised barley roots. *Kgl. Lantbrhögsh Ann.*, **16**, 328-333.

ELGABALY M. M., WICKLANDER L., 1962. On the mecanism of anion uptake by plant roots (1). *Soil Sci.*, **93**, 281-285.

EPSTEIN E., HAGEN C. E., 1952. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. *Plant Physiol.*, **27**, 457-474.

EPSTEIN E., LEGGET J. E., 1954. The absorption of alkaline earth cations by barley roots. Kinetics and mechanisms. *Amer. J. Bot.*, **41**, 785-791.

EPSTEIN E., 1955. Passive permeation and active transport of ions in plant roots. *Plant Physiol.*, **30**, 529-535.

EPSTEIN E., 1956. Mineral nutrition of plants : Mechanisms of uptake and transport. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **7**, 1-24.

EPSTEIN E., JEFFERIES R. L., 1964. The genetic basis of selection ion transport in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **15**, 169-184.

FAWZY H., OVERSTREET R., JACOBSON L., 1954. The influence of hydrogen ion concentration on cation absorption by barley roots. *Plant Physiol.*, **29**, 234-237.

FOX R. L., LIPPS R. C., 1960. Distribution and activity of roots in relation to soil properties. *Trans. VIIth internation. Congr. Soil Sci.*, **3**, 260-267.

MCGEORGE W. T., 1932. Chemical equivalent base exchange reaction in plants. *Plant Physiol.*, **7**, 119-124.

GOUNY P., 1955. Observations sur les particularités de l'alimentation ammoniacale en l'absence et en présence de calcaire. *Ann. agron.*, **4**, 589-614.

GRAY B., DRAKE M., COLBY W., 1953. Potassium competition in grass-legume associations as a function of root cation exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 235-239.

GRAHAM E. R., BAKER W. L., 1951. Ionic saturation of plant roots with special reference to hydrogen. *Soil Sci.*, **72**, 435-441.

GUNAR I. I., 1958. Periodicity in absorption and excretion by roots. *Proc. 2nd internation Conf. Atom. Energy*, **27**, 74-84.

HARTREE E. F., 1957. Cytochrome in higher plants. *Adv. Enzymol.*, **18**, 1, 64.

HAUSSMANN G., 1957. La fumure potassique dans les prairies irriguées de culture intensive. *Potassium Symposium*, 242-271.

HELMY A. K., ELGABALY M. M., 1958. Exchange capacity of plant roots. 1. Factors affecting the titration value. *Plant and Soil*, **10** (1), 78-92.

HEINTZE S. G., 1961. Studies on cation exchange capacities of roots. *Plant and Soil*, **13**, 365-383.

JACOBSON L., OVERSTREET R., KING M. H., HANDLEY R., 1950. A study of potassium absorption by barley roots. *Plant Physiol.*, **25**, 639-647.

JACOBSON L., 1955. Carbon dioxyde fixation and ion absorption in barley roots. *Plant Physiol.*, **30**, 264-269.

JENNY H., OVERSTREET R., AYERS A. D., 1939. Contact depletion of barley roots as revealed by radioactive indicators. *Soil Sci.*, **48**, 9-24.

JENNY H., 1951. *Mineral nutrition of plants*. E. Truog (Ed), Wisconsin Press, 107-131.

JENNY H., GROSSENBACHER K., 1963. Root-soil boundary zones as seen in the electron microscope. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 273-277.

KELL R. C., 1961. A flottation method for easy separation of roots from soil samples. *Agron. J.*, **53** (1), 56-57.

KELLER P., DEUEL H., 1957. The cation exchange capacity and pectin content of plant roots. *Z. Pflanzenernähr.*, **79**, 119-131.

KELLER P., 1960. Kationenaustausch von abgetöteten Pflanzenwurzeln. *Diss. Eidg. tech. Hochsch.* Zurich.

LAGERWERF J. V., 1960. The contact-exchange theories amended. *Plant and Soil*, **13**, 253-264.

LAGERWERF J. V., 1965. Multiple-rate effect in ion transfer. *Soil Sci.*, **100**, 25-33.

LATIES G. G., 1959. Active transport of salt into plant tissue. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **10**, 87-112.

MCLEAN E. O., BAKER F. E., 1953. Cationic activities in systems of plant roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 100-102.

MCLEAN E. O., ADAMS D., FRANKLIN R. E., 1956. Cation exchange capacity of plant roots as related to their nitrogen contents. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 345-347.

MCLEAN E. O. 1957. Plant growth and uptake of nutrients as influenced by levels of nitrogen. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **21**, 219-222.

LEFEVRE P. 1961. Contribution à l'étude de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols non calcaires. *Ann. agron.*, **12**, (2), 169-206.

LINGLE J. C. CAROLUS R. L. 1956. Mineral nutrition of celery varieties with special reference to sodium and boron. *Proc. Amer. Soc. hortic. Sci.* **68**, 309-317.

LUNDEGARTH H., 1942. Electrochemical relations between the root system and the soil. *Soil Sci.*, **51**, 177-189.

LUNDEGARTH H., 1942. Studies on certain electrochemical properties of the root systems of plants. *Lauth. Acad. Tidskr.*, **81**, 115-126.

LUNDEGARTH H., 1955. Mechanisms of absorption, transport, accumulation and secretion of ions. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **6**, 1-24.

MALQUORI M., 1964. Antagonisme et interdépendance des principes fertilisants. *Ve Congr. mondial Fertil.* Zurich, mai.

MARSHALL C. E., UPCHURCH W. J., 1953. Chemical factors in cation exchange between root surfaces and nutrient media. *Proc. Soil Sci. Amer. Soc.*, **17**, 222-227.

MATTSON S., 1948. Laws of ionic exchange. III : Donnan equilibria in plant nutrition. *Lantbrhögsk. Ann.*, **15**, 308-316.

MATTSON S., ERICKSON E., VAHTRAS K., WILLIAMS E. G., 1959. Phosphate relationship of soil and plant. *Ann. r. agric. Coll. Sweden*, **16**, 457-489.

MEHLICH A., 1953. Factors affecting adsorption of cations by plant roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 231-234.

MEHLICH A., 1952. Effect of iron and aluminium oxydes on the release of calcium and on the cation-anion exchange properties of soils. *Soil Sci.*, **73**, 361-374.

MEHLICH A., COLEMAN N. T., 1952. Type of soil colloid and the mineral nutrition of plants. *Adv. Agron.*, **4**, 67-99.

MEHLICH A., DRAKE M., 1955. in BEAR F.E. (Ed) : *Chemistry of the soil. Soil chemistry and plant nutrition*, New York.

MITSUI S., VEDA M., 1960. Dynamic studies on the nutrient uptake by crop plant. Method of the determination of cation exchange capacity of plant roots and its intensity. *Journ. Sci. Soil Manure. Jap.*, **30**, 487-491.

MORITA S., AOKI A., 1960. Studies on nutrient uptake by the roots of fruit trees. Cation exchange capacity of root and its cation adsorption from solution. *Dep. Soil Sci. Kyoto Prefectural University*, 234-236.

MOUAT M. C. H., WALKER T. W., 1949. Competition for nutrient between grasses and white clover. Effect of root cation exchange capacity and rate of emergence of associated species. *Plant and Soil*, **11**, 41-51.

MOUAT M. C. H., 1960. Interspecific differences in strontium uptake by pasture plants as a function of root cation exchange capacity. *Nature*, **188**, 513-514.

MOUAT M. C. H., 1962. Genetic variation in root cation exchange capacity of rye grass. *Plant and Soil*, **16** (2), 263-265.

MULLER J., 1963. Données expérimentales sur les phénomènes de contact entre particules et racines. *Bull. Soc. fr. Physiol. vég.*, **9**, (4) 223-232.

NIELSEN T. R., OVERSTREET R., 1955. A study of the role of the hydrogen ion in the mechanism of K absorption by excised barley roots. *Plant Physiol.*, **30**, 303-309.

NIJENSOHN L., 1959. Determination of the cation exchange capacity. *Rev. Fac. Ci. agric.* (Mendoza), **7**, 55-56.

OSTERHOUT W. J. V., 1947. Absorption des électrolytes dans les grandes cellules végétales. *Bot. Rev.*, **13**, 194-215.

OVERSTREET R., BROYER T. C., ISAACS T. L., DELWICHE C. C., 1942. Additional studies regarding the cation absorption mechanism of plants in soil. *Amer. J. Bot.*, **29**, 227-231.

PETERBURGSKII A. B., NELOUBOVA G. L., 1959. Problèmes de la détermination de la capacité d'absorption des ions par les racines végétales. *Dokl. Tcxa. Timirjazev.*, **70**, 107-110.

RAINS D. W., SCHMID W. E., EPSTEIN E., 1964. Absorption of cations by roots. Effects of hydrogen ions and essential role of Ca. *Plant Physiol.*, **39**, 274-278.

RATNER E. I., 1944. Interaction between roots and soil colloids as a problem of the physiology of mineral nutrition of plants. Unstable equilibria in the cation exchange between the roots of plants and the soil colloids. *Dokl. Akad. Nauk S. S. S. R.*, 46.

RATNER E. I., 1945. Interaction between roots and soil colloids as a problem of mineral nutrition of plants. Role of the root system. *Dokl. Akad. Nauk S. S. S. R.*, **48**, 64-67.

SALSAC L., 1966. Absorption du calcium dans les racines de lupin jaune et de féverole. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **262**, 2462-2464.

SCHEFFER F., WELTE E., 1955. Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde. **2**, 184-209 (Enke, Stuttgart).

SCHUFFELEN A. C., 1954. Absorption du potassium par les plantes. *Potassium-Symposium*, 169-180.

SMITH R. L., WALLACE A., 1956. Cation exchange capacity of roots and its relation to Ca and K content of plants. *Soil Sci.*, **81** (2), 97-109.

SMITH R. L., WALLACE A., 1956. Influence of nitrogen fertilization, cation concentration and root cation exchange capacity on Ca and K uptake by plants. *Soil Sci.*, **82** (2), 165-172.

TENDELOO H. J. C., VERVELDE G. J., 1944. Electrochemical behaviour of exchangeable cations and anions. Potential measurement of plant roots. *Versl. Nederl. Akad. Watersach. Naturkunde*, **53**, 169-177.

TEPE W., 1956. Die Bestimmung der Bodenleistung mit Ionenaustauscher im Hinblick auf die Ernährung der Pflanzen. *Landw. Forsch.*, **7**, 83.

TEPE W., LEIDENFROST E., 1956. Einfluss des H^+/HCO_3^- Verhältnisses und der Selektivität bei der Bestimmung der Bodenleistung mit Ionenaustauschern. *Für Pflanzenernähr, Düng und Bodenkunde*, **75**, 3, 222-227.

VAGELER P., 1932. *Der Kationen- und Wasserhaushalt des Mineralbodens.* Springer, Berlin.

VAN DER HENDE A., COTTENIE A., 1957. Influence de la fumure potassique sur la composition chimique et la valeur fourragère des herbages. *Potassium symposium*, 113-118.

VENEMA K. C. W., 1952. Concentration et activité ionique. *Rev. Potasse*, mars.

VENEMA K. C. W., 1952. Quelques observations nouvelles sur la fertilisation. A. Considérations générales. *Rev. Potasse*, mai.

VENEMA K. C. W., 1952. Quelques observations nouvelles sur la fertilisation. B. La question des cations. C. La question des anions. D. La capacité d'adsorption du système radiculaire. E. Sur la constance de la somme des cations. *Rev. Potasse*, juin-sept.

VERVELDE G. J., 1953. The Donnan principle in the ionic relations of plant roots. *Plant and Soil*, **4**, 309-332.

VERVELDE G. J., 1955. A physico-chemical analysis of salt accumulation by plant roots. *Plant and Soil*, **6**, 226-244.

VOSE P. B., RANDALL P. J., 1962. Résistance to Al and Mn toxicities in plants related to variety and cation exchange capacity. *Nature*, 196, 85-85.

WALKER T. W., 1960. Uptake of ions by plants growing in soil. *Soil Sci.*, **89**, 328-332.

WANDER I. W., 1955. The effect of ammonium and nitrate nitrogen on the exchange capacity of rough lemon roots. *Soil Sci. Soc. Fla. Proc.*, **15**, 101-107.

WELCH H. V., WALLACE A., MUELLER R. T., 1954. Influence of factorially combined levels of cations and nitrate ions adsorbed on ion-exchange resins of the nutrient absorption by plants. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **18**, 137-140.

WIERSUM L. K., BAKEMA K., 1959. Competitive adaptation of the cation exchange capacity of roots. *Plant and Soil*, **11** (3), 287-292.

WIKLANDER L., ELGABALY M. M., 1955. Relative uptake of adsorbed monovalent and divalent cations by excised barley roots as influenced by the exchange capacity. *Soil Sci.*, **89**, 91-93.

WILLIAMS D. E., COLEMAN N. T., 1950. Cation exchange properties of plant root surfaces. *Plant and Soil*, **2**, 243-256.

« X » édit., 1962. Genetic variations in roots cation exchange capacity of Ray-Grass. *Plant and Soil*, **16**, 2, 263-265.

« X » edit., 1941. Base exchange and plant nutrition. *Soil Fertil.*, **4**, 101-102.

« X » edit., 1964. Conditions d'emploi des phosphates naturels. *B. I., Ministère Agric. Frauce.* n° 203, 17 octobre.

« X » edit., 1962. Anion exchange properties of plant root surface. *Science*, **138**, 153-154.

YORK E. T., 1957. Comments regarding the use of potash in forage production in the United States. *Potassium Symposium*, 275-279.

Ann. agron., 1967, **18** (1), 65-90.

ÉTUDE DES MÉCANISMES DE LA DESTRUCTION DES AGRÉGATS DE TERRE AU CONTACT DE SOLUTIONS AQUEUSES (1)

J. CONCARET
avec la collaboration technique de G. RUNSER

Station agronomique, 89 - Auxerre

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PREMIÈRE PARTIE. — ÉNONCÉ D'UNE THÉORIE

CHAPITRE I — *Les principales hypothèses proposées. Intervention de l'aspect dynamique du phénomène.*
CHAPITRE II — *Étude théorique des phénomènes capillaires intervenant au cours de l'humectation des agrégats — Énoncé d'une théorie.*

DEUXIÈME PARTIE. — ANALYSE EXPÉRIMENTALE DU PHÉNOMÈNE

CHAPITRE I — *Technique analytique — Confirmation du phénomène d'éclatement.*
CHAPITRE II — *Action de la viscosité.*
CHAPITRE III — *Intervention de la vitesse d'humectation.*
CHAPITRE IV — *La cohésion.*
CHAPITRE V — *Vérification de la théorie.*

TROISIÈME PARTIE. — DISCUSSION

CHAPITRE I — *Importance relative des deux paramètres principaux.*
CHAPITRE II — *La pression interne.*
CHAPITRE III — *La cohésion et les conditions d'hydratation.*

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

(1) Le travail a fait l'objet d'une Thèse de Docteur-Ingénieur soutenue le 15 avril 1966, à la Faculté des Sciences de Strasbourg. La deuxième partie de ce travail paraîtra dans le n° 2 des Annales agronomiques.

INTRODUCTION

La stabilité de la structure du sol en place dépend de si nombreux facteurs qu'il est nécessaire que l'on dispose de tests de laboratoire pour la juger. Ces tests peuvent être basés sur des opérations plus ou moins empiriques ou se référer au comportement de modèles. C'est ainsi que l'étude de la stabilité de la structure s'est trouvée simplifiée, en imaginant que la destruction des particules de terre était commandée par un mécanisme d'éclatement sur lequel nous reviendrons.

Ce modèle était basé sur des considérations statiques et ne paraissait pas susceptible d'inclure certains faits expérimentaux. Le but de ce travail est de compléter ces considérations statiques par un aspect dynamique.

PREMIÈRE PARTIE

ÉNONCÉ D'UNE THÉORIE

CHAPITRE I

LES PRINCIPALES HYPOTHÈSES PROPOSÉES. INTERVENTION DE L'ASPECT DYNAMIQUE DU PHÉNOMÈNE

Les théories antérieures

Les recherches concernant les mécanismes de destruction ont conduit à deux thèses principales :

L'une (SCHLŒSING, 1885) fait appel aux phénomènes de dispersion des colloïdes constituant les ciments de liaison entre les particules élémentaires de sol, cette dispersion ayant pour effet de libérer les constituants de la motte. Il est incontestable que certains sols, en particulier ceux dont le complexe argilo-humique est très chargé en sodium, subissent une dispersion au contact de l'eau. Toutefois cette explication n'est pas applicable dans le cas le plus général et des tests de dispersion ne rendent pas compte totalement du comportement des sols en place.

BARY (1931) pour les gels de silice, YODER (1936) et HÉNIN (*thèse 1938*) pour les sols ont établi un schéma basé sur l'éclatement provoqué par la compression de l'atmosphère interne de l'agrégat sous l'influence des forces développées par la pénétration capillaire de l'eau à l'intérieur des pores du sol. Ce schéma, sans négliger les processus secondaires pouvant intervenir dans des cas particuliers, met en cause la cohésion des agglomérats terreux et leurs conditions d'hydratation sous forme de l'affinité sol-eau. HÉNIN a pu mettre en évidence le phénomène d'éclatement grâce à une série de manipulations effectuées parallèlement sur des agrégats non modifiés et sur d'autres appartenant aux mêmes échantillons mais préalablement vidés de l'air qu'ils pouvaient contenir.

Cet auteur a explicité les conditions de stabilité (s) en écrivant :

$$s = C - \frac{2\,T_2 \cos \alpha}{R} \qquad (1)$$

où

C est la cohésion de la terre humide
T_2 la tension superficielle de l'eau
R le rayon des plus gros capillaires
et α l'angle de raccordement sol-eau

Le terme $\frac{2\ T_2 \cos \alpha}{R}$ représente la pression résultant de la pénétration de l'eau dans un capillaire du sol et l'expression $s = C - \frac{2\ T_2 \cos \alpha}{R}$ signifie que les agrégats restent stables dans la mesure où les forces développées par la pénétration capillaire dans les plus gros pores demeurent inférieures aux forces de cohésion liant les particules élémentaires constituant l'agglomérat terreux.

Si : T_1 est la tension superficielle du sol
et T_{1-2}, la tension interfaciale sol-eau,

on peut écrire : (triangle de Neuman) :

$$T_1 = T_{1-2} + T_2 \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{T_1 - T_{1-2}}{T_2}$$

L'équation (1) devient :

$$s = C - \frac{2\ (T_1 - T_{1-2})}{R} \qquad (2)$$

et en introduisant l'affinité sol-eau A (formule de DUPRÉ : $A = T_1 + T_2 - T_{1-2}$).

$$s = \frac{R\ C - 2\ A + 2\ T_2}{R} \qquad (3)$$

Les conditions d'éclatement peuvent aisément se déduire de ces formules.

Cette interprétation du phénomène permet de superposer les effets des conditions d'hydratation c'est-à-dire du gonflement (équation 3) et de l'éclatement (équation 1).

Cependant, si elle rend compte d'un certain nombre de propriétés, elle ne répond pas aux questions que l'on peut se poser concernant le fonctionnement de ces mécanismes.

On peut en particulier se demander comment l'air est enfermé dans les agrégats au moment où ceux-ci sont plongés dans l'eau.

Le phénomène d'éclatement est, en effet, sous la dépendance du volume d'air inclus à l'intérieur de l'agrégat au moment de la rupture, c'est-à-dire de la manière dont l'atmosphère interne de l'agrégat est comprimée.

Il est malheureusement impossible de déterminer *a priori* les caractéristiques essentielles de la particule, telles que sa mouillabilité ou sa cohésion. De même, il est difficile d'imaginer les conditions exactes du captage de l'air dans l'agrégat sans une étude expérimentale préalable.

Toutefois, les travaux antérieurs ont établi :

— L'influence de la mouillabilité en comparant le comportement d'agrégats naturels avec celui de particules ayant fixé une petite quantité de substances hydrophobes (HÉNIN, 1938). Depuis, MONNIER (*thèse 1965*), a pu montrer que le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène varie en raison inverse de la mouillabilité du sol.

— L'influence de la cohésion par la mise en évidence des augmentations de stabilité à mesure qu'augmente la teneur en argile. Cet effet a été prouvé en établissant un parallélisme entre la stabilité et la cohésion des agrégats mesurés à sec. Il est évident qu'une telle comparaison n'est valable que si le classement des agrégats quant à leur cohésion est semblable à sec et après humectation. Ce parallélisme ne tient plus dès que les ciments ne sont pas constitués par de l'argile au sens minéralogique du terme ou si l'on modifie la nature des cations échangeables.

Il était donc nécessaire de reprendre ces comparaisons sur la terre humide telle qu'elle se présente au moment de la rupture des agrégats.

— Enfin, on a tenté de mettre en évidence le rôle de l'affinité sol-eau. Ces essais ont été conduits en modifiant l'énergie libre de l'eau par l'introduction de différents solutés. Ils ont effectivement montré que l'utilisation de solutions au lieu d'eau pure permet d'accroître la résistance des agrégats à la destruction (tabl. 1).

TABLEAU I

Variation de l'activité protectrice de solutions salines en fonction de leur énergie libre

(S. HENIN)

Nature du soluté	Température d'ébullition de la solution (°C)	P. 100 d'agrégats stables > 0,2 mm		
		Horizon A	Horizon B	Horizon C
NO_3NH_4	112	40	26	10
	105	29	20	7,5
	102	26,5	18	6
	100	24,5	10	4
Cl_2Mg	118	43	32	10
	103	26,5	12	6
	100	24	9	4
Cl_2Ca	111	32	20	9
	102	25	15	6
	100	24	9	4

En fait, dans ces expériences, s'il est bien exact que l'énergie libre est modifiée, l'introduction de solutés modifie également toute une série de propriétés du solvant et, en particulier, la tension superficielle et la viscosité. D'autre part, le soluté est susceptible d'avoir une action sur le matériel d'expérience en changeant, par exemple, la distribution des cations échangeables.

Cependant, le fait que l'utilisation de solutés différents peut permettre de faire varier séparément ou simultanément plusieurs propriétés du solvant doit permettre

une analyse du phénomène. En effet le système terre-liquide reste dans les mêmes conditions, les seules variables étant celles provoquées par l'introduction du soluté.

Nous avons effectué des analyses d'agrégats sur une série de terres de composition granulométrique variée (tabl. 2) et dans des solutions salines à diverses concentrations en utilisant une technique voisine de celle de HÉNIN. Les graphiques de la figure 1 rendent compte des résultats de ces essais. En ordonnée sont portés les pour-

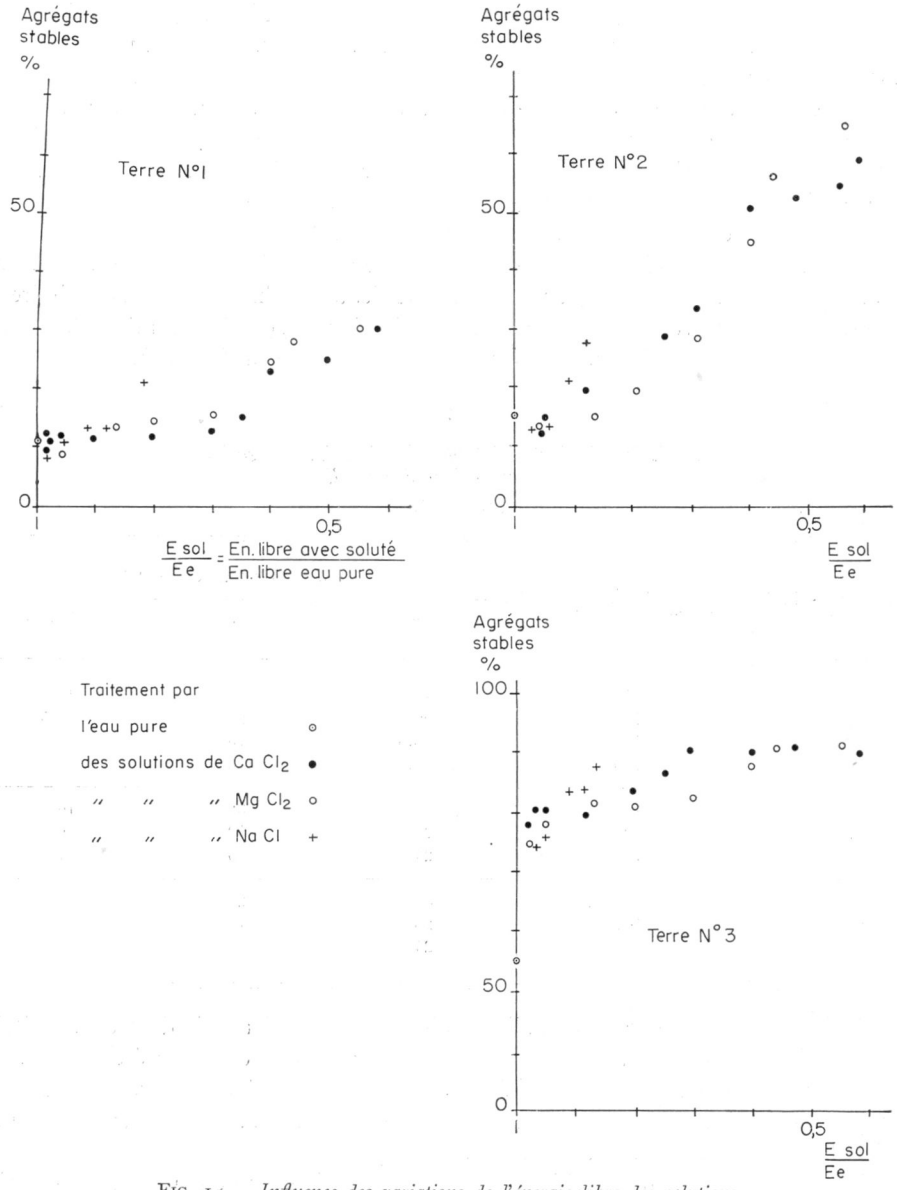


FIG. 1. — *Influence des variations de l'énergie libre des solutions de traitement sur le taux d'agrégats stables*

centages d'agrégats stables, en abscisse figurent les variations d'énergie libre entraînées par l'introduction des solutés en prenant pour unité l'énergie libre de l'eau pure.

TABLEAU 2

Composition granulométrique des terres
(1re série) — (en pour cent de terre sèche)

Terre n°	Origine de la terre	Matières organiques	< 2 μ	2 à 20 μ	20 à 50 μ	Calcaire %
1	Horizon B des cases C.N.R.A. à Versailles	0,6	29	20,4	42,4	0
2	Horizon A : ferme de la Minière C.N.R.A.	1,4	16,3	24,8	45,5	0
3	Terre argileuse des Marais de l'Ouest	3,4	60,7	28,7	1,8	1,4

On observe bien une certaine influence de la variation d'énergie libre sur la stabilité de la structure sans qu'il soit possible pour autant de décider si l'énergie libre est seule responsable du phénomène ou si cette responsabilité incombe à une ou plusieurs autres propriétés ayant varié en même temps.

La viscosité. Intervention de l'aspect dynamique du phénomène

Or, dans le cas des solutions salines, l'un des facteurs subissant des variations importantes avec la concentration est la viscosité. Il s'agissait donc, pour vérifier l'influence possible de la viscosité, d'utiliser des solutions pour lesquelles l'augmentation de viscosité est liée non pas à des variations d'énergie libre mais simplement au poids moléculaire du soluté. Nous avons choisi des solutions de saccharose. Ce soluté entraîne une augmentation importante de viscosité avec sa concentration. Par contre, l'énergie libre varie peu. De plus, l'addition de saccharose ne provoque aucune variation notable de tension superficielle.

Le tableau 3 résume les résultats obtenus pour les trois terres en traitement.

TABLEAU 3

Influence de la viscosité sur la stabilité structurale

Terre n°	Stabilité structurale mesurée dans l'eau pure	Stabilité structurale mesurée dans des solutions de saccharose de viscosité (en centipoises) :	
		1,7	14
1	11	16	45
2	14	22	65
3	55	71	85

La lecture de ce tableau montre bien que la seule augmentation de viscosité de la solution, dans laquelle le pourcentage d'agrégats stables est mesuré, entraîne un effet protecteur important.

Cet effet protecteur de la viscosité a été vérifié dans d'autres liquides qui, comme les solutions de saccharose, doivent au seul poids moléculaire du soluté l'augmentation de leur viscosité. Il s'agissait de solutions de gomme du Sénégal (concentration 18 p. 100). Le pourcentage d'agrégats stables est très largement supérieur à celui mesuré dans l'eau pure ainsi que l'on peut en juger par les résultats obtenus pour les trois premières terres en expérimentation :

Terre n° 1 : 84 p. 100
Terre n° 2 : 80 p. 100
Terre n° 3 : 88 p. 100

Le facteur viscosité n'était pas inclus dans la théorie antérieure. Son intervention exclut une interprétation basée seulement sur des données statiques et impose de poser le problème en termes dynamiques.

Nous avons donc repris l'étude des modèles en nous efforçant d'analyser cet aspect dynamique du phénomène :

CHAPITRE II

ÉTUDE THÉORIQUE DES PHÉNOMÈNES CAPILLAIRES INTERVENANT AU COURS DE L'HUMECTATION DES AGRÉGATS. ÉNONCÉ D'UNE THÉORIE

Remarques théoriques. Possibilités d'échappement de l'air

La pénétration de l'eau dans les pores du sol obéit aux lois de la capillarité. Pour un agrégat de la taille de ceux mis en expérience, c'est-à-dire de diamètre compris entre 1 et 2 mm, les dimensions sont faibles. De plus, l'eau pénètre dans toutes les directions. C'est pourquoi nous avons traité le problème comme s'il s'agissait de pores horizontaux.

Le ménisque liquide est animé d'une vitesse v que l'on peut exprimer sous la forme (BOUASSE, 1924, d'après Poiseuille) :

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{r^2}{8\eta z} \mathrm{P}$$

où t est le temps
z, la longueur de la colonne de liquide
r, le rayon du capillaire considéré
η, la viscosité du liquide
P, la pression capillaire

avec $$\mathrm{P} = \frac{2\ \mathrm{T}_2 \cos \alpha}{r}$$

si T_2 est la tension superficielle du liquide
et α son angle de raccordement avec le sol

Il vient donc :

$$v = \frac{r^2}{8\eta z} \quad \frac{2\ \mathrm{T}_2 \cos \alpha}{r}$$

$$v = \frac{2\ r\ \mathrm{T}_2 \cos \alpha}{8\eta z} \qquad (4)$$

Considérons maintenant deux pores de rayons R et r, communiquant tous deux avec l'extérieur.

Pour une même longueur atteinte par l'eau, le rapport des vitesses respectives de progression des ménisques dans les deux pores est :

$$\frac{VR}{Vr} = \frac{R}{r}$$

et si R est plus grand que r, on a $VR > Vr$

L'eau pénètre donc plus vite dans les pores dont le rayon est plus grand et, en conséquence, une même longueur mouillée est atteinte plus rapidement par le liquide dans un gros pore que dans un petit pore.

Avant l'humectation, les pores, plus ou moins anastomosés sont remplis d'air. Cet air se trouve comprimé par la poussée des ménisques et son emprisonnement dépend des rapports de vitesse des ménisques avançant dans les différents canalicules.

Cependant, les conditions de compression de l'air peuvent être telles qu'il peut s'échapper en partie à l'orifice de certains pores avant que le ménisque ait pu se former. Les agrégats ont d'ailleurs une forme très irrégulière et l'on peut penser que la particule n'est pas immédiatement mouillée sur toute sa surface.

En effet, s'il est impossible d'analyser un tel phénomène, du moins est-il raisonnable d'appliquer aux irrégularités un raisonnement analogue à celui fait pour les pores et d'admettre que les solutions visqueuses s'étalent plus rapidement sur des surfaces planes avant la formation des ménisques à l'orifice des pores que sur les surfaces irrégulières des agrégats.

Des bulles d'air peuvent donc se former à l'orifice des pores non obstrués et constituer ainsi une protection à l'égard du liquide environnant.

Sous l'effet des forces capillaires développées par les ménisques progressant dans les pores mouillés, une partie de l'air inclus peut ainsi s'échapper.

Ces remarques théoriques sont d'ailleurs confirmées par l'observation directe

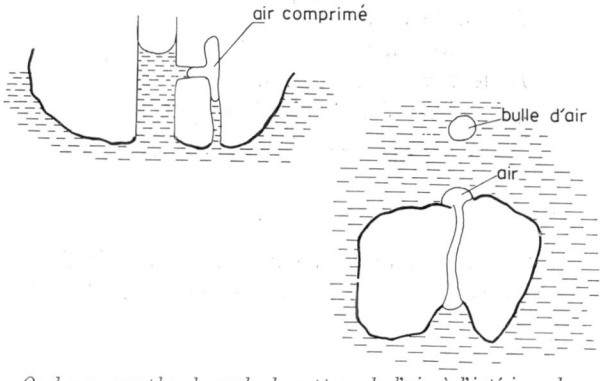


FIG. 2. — *Quelques exemples de mode de captage de l'air à l'intérieur des agrégats*

En effet, si l'on plonge brutalement des agrégats dans l'eau, on peut remarquer, précédant l'éclatement, des chapelets de petites bulles d'air s'échappant de l'agglomérat. Cela indique bien que certains pores ne sont pas obstrués par les ménisques liquides et que, par leurs orifices, une partie de l'air primitivement inclus dans l'agrégat peut s'échapper.

Nous avons schématisé (figure 2) quelques exemples d'emprisonnement ou d'échappement de l'air, ceux-ci n'étant bien entendu nullement limitatifs car de multiples autres cas peuvent certainement se présenter.

On ne peut évidemment étudier que des cas particuliers.

Toutefois, en tenant compte des remarques précédentes, il semble que les phénomènes principaux entrant en jeu soient :

— d'une part, les vitesses respectives de pénétration des ménisques dans les capillaires selon les diamètres des pores ;

— d'autre part la manière dont le liquide est susceptible de s'étaler à la surface de la particule.

La théorie antérieure supposait que tout l'air contenu dans les agrégats restait emprisonné. En fait, nous venons de voir qu'une partie de l'air peut s'échapper sous pression.

S'il en est ainsi, on peut penser que selon la façon dont l'air sera emprisonné et selon les possibilités d'échappement qui lui seront offertes, sa compression sera différente et entraînera des efforts variables s'opposant aux forces de cohésion.

Il convient donc d'examiner, dans cette nouvelle optique, la pression interne à laquelle est soumis l'air inclus dans les agrégats.

La pression interne

Considérons, pour un agrégat, que :

V_o est sa porosité totale.

P_o, la pression atmosphérique.

P_i, la compression atteinte par l'atmosphère interne de l'agrégat par suite de la poussée des ménisques liquides.

V_i, le volume occupé par l'atmosphère interne à la pression P_i.

V_e, le volume d'air ayant pu s'échapper avant l'éclatement.

On peut écrire :

$$P_o (V_o - V_e) = P_i V_i$$

soit

$$P_i = \frac{P_o (V_o - V_e)}{V_i}$$

V_i peut être explicité en tenant compte du liquide ayant pénétré dans les capillaires mouillés.

En effet :

$$V_i = V_o - n \pi R_i^2 z$$

Si n est le nombre de capillaires mouillés

R_i leur rayon moyen

et z la longueur atteinte par les ménisques à l'intérieur des capillaires.

Il vient alors :

$$P_i = \frac{P_o (V_o - V_e)}{V_o - n \pi R_i^2 z} \qquad (5)$$

On peut représenter graphiquement les variations de P_i en fonction de z (fig. 3). Nous avons tracé quelques-unes des courbes de la famille représentée par l'équation (5) aux différentes valeurs de V_e.

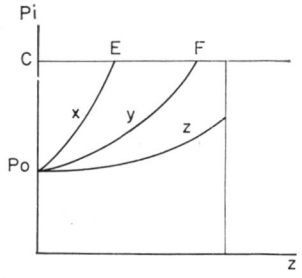


FIG. 3. — *Variations de la pression interne au cours de l'humectation*

L'éclatement à lieu lorsque P_i atteint la cohésion C de la terre humide.

Si V_e est nul, l'éclatement a lieu en E (courbe X).

En réalité l'air n'est pas totalement emprisonné ainsi que nous l'avons constaté précédemment par le raisonnement et par l'observation, donc V_e n'est pas nul. Une partie de l'air inclus initialement dans l'agrégat peut s'échapper par certains pores. En conséquence, l'accroissement de la pression interne est moins rapide. Le phénomène peut donc se représenter sous forme de la courbe Y, l'éclatement se produisant en F c'est-à-dire pour une pénétration plus profonde des ménisques liquides. Il peut aussi arriver que la quantité d'air susceptible de s'échapper soit telle que la pression critique d'éclatement ne soit jamais atteinte. Ce cas est représenté par la courbe Z, pour laquelle l'agrégat a été imbibé entièrement avant que la pression interne ait pu s'élever jusqu'à la pression critique d'éclatement.

Cette représentation graphique schématise un phénomène qui, de par la nature même du matériau, est beaucoup plus complexe. En effet, les pores du sol sont difficilement assimilables à des capillaires parfaits, leur forme et leur dimension étant extrêmement variables. De plus au cours de l'humectation, la terre subit une augmentation de volume apportant certainement des modifications importantes dans le système capillaire primitif de l'agrégat.

Cependant, dans l'état actuel de nos moyens d'investigation, ces différents points nous sont pratiquement inaccessibles. Les simplifications apportées permettent de dégager le sens d'un mécanisme physique. Il est évidemment nécessaire de le confronter avec les faits réels par des séries d'expériences sur le matériau considéré. Dans la mesure ou les résultats expérimentaux concorderont avec la théorie il sera alors possible d'admettre que ce mécanisme rend effectivement compte, en les dépouillant d'effets secondaires, des phénomènes qui se déroulent dans le milieu naturel.

Énoncé d'une théorie

A la suite de ces remarques on est conduit à admettre le mécanisme théorique suivant dont les conséquences seront soumises à l'expérience :

Lorsqu'un agglomérat de terre est plongé dans un liquide, celui-ci pénètre par les plus gros pores alors que, sous l'influence de la poussée des ménisques liquides,

une partie de l'atmosphère interne de l'agrégat s'échappe par certains capillaires non obstrués. La vitesse de pénétration d'une part et la vitesse d'échappement de l'air d'autre part, règlent l'établissement d'une pression interne qui, si elle atteint une valeur supérieure à celle des forces de cohésion liant les particules élémentaires de la terre humide, provoque l'éclatement de l'agrégat.

Afin d'introduire cet aspect dynamique du phénomène, nous avons été amenés à modifier la formule de HÉNIN en écrivant :

$$s = C - P_i$$

où

s représente la résultante des conditions déterminant la stabilité des agrégats, c'est-à-dire la différence entre deux forces opposées constituées par :

— la cohésion de la terre humide C ;

— la pression maximale susceptible d'être atteinte par l'air emprisonné dans l'agrégat, P_i.

DEUXIÈME PARTIE

ANALYSE EXPÉRIMENTALE DU PHÉNOMÈNE

CHAPITRE I

TECHNIQUE ANALYTIQUE. CONFIRMATION DU PHÉNOMÈNE D'ÉCLATEMENT

Méthode

Les différents éléments réunis dans les pages qui précèdent montrent le nombre important de facteurs pouvant entrer en jeu dans le phénomène de destruction des agrégats.

Afin de définir leur importance respective, il importe évidemment d'utiliser des liquides de traitement susceptibles d'entraîner des modifications connues pour un ou plusieurs des paramètres intervenant dans le mécanisme.

Le jeu des comparaisons entre le taux d'agrégats stables mesurés dans les différents liquides devraient alors permettre de préciser le rôle réel des paramètres en cause.

Test de stabilité

Il convient évidemment de disposer d'une technique de mesure pouvant rendre compte des incidences de l'emploi de tels liquides de traitement sur le pourcentage d'agrégats restant stables.

Au cours de ses travaux sur la stabilité structurale, HÉNIN a mis au point une technique analytique permettant le calcul d'un indice S d'instabilité. Ce test est appliqué sur des agrégats dont le diamètre est inférieur à 2 mm.

Il consiste à effectuer un tamisage sous l'eau (tamis de 0,2 mm) de l'échantillon après différents prétraitements suivis d'une imbibition brutale par l'eau. On recueille sur le tamis les particules restées stables. Afin de rendre le tamisage aussi régulier que possible FEODOROFF a proposé un appareil mécanisant partiellement l'opération. Les éléments fins dispersés sont également mesurés pour les échantillons prétraités ou non. L'indice S est obtenu par calcul en combinant les différents résultats. Il permet de porter un jugement sur le comportement des sols en place et parfois sur les raisons de ce comportement.

Nous avons adopté cette technique mais en lui apportant d'importantes simplifications :

Les prises sur lesquelles les mesures sont effectuées sont constituées d'agglomérats de terre restant entre les tamis de maille 1 et 2 mm afin d'être assuré d'opérer sur les agrégats seuls et non sur les particules élémentaires qui les composent. 5 g d'agrégats ainsi triés sont imbibés brutalement par le liquide de traitement dans un bécher de 250 cc forme haute. Après une attente de 30 minutes, le contenu du bécher est déversé sur un tamis (mailles de 0,2 mm). Le tamisage dans le même liquide de traitement est effectué à un rythme régulier grâce à l'appareil de FEODOROFF (30 coups en 30 secondes). Après lavage si nécessaire et séchage, le poids des particules terreuses restées sur le tamis permet de déterminer le pourcentage d'agrégats stables pour le traitement considéré.

Afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats, chaque essai est réalisé en double et renouvelé lorsque les écarts sont jugés trop importants.

Cette technique ne peut permettre une mesure absolue car les actions mécaniques du tamisage font intervenir des phénomènes d'abrasion auxquels les terres les plus fragiles peuvent être très sensibles. Cependant les essais effectués ont pour but de comparer les comportements d'une même terre soumise à différents traitements et n'exigent donc que la connaissance de valeurs relatives.

Les sables grossiers appartenant à la fraction comprise entre 0,2 et 2 mm restent sur le tamis. Nous avons exprimé tous les résultats en tenant compte de cette fraction qui n'intervient d'ailleurs vraiment que pour trois des terres retenues.

TABLEAU 4

Composition granulométrique des terres en expérimentation
(en pour cent de terre sèche)

Désignation et origine des échantillons	Matières organiques	$<2\mu$	2 à 20μ	20 à 50μ	50 à 200μ	0,2 à 2 mm	Calcaire
5 — Laumes — Sol argileux de la région de Dijon	2,6	66,1	25	6	0,2	0,1	0
6 — Manhoue (Moselle) — Terre sensible au tassement et à l'hydromorphie	1,3	50,4	27,3	19,2	1,2	0,6	0
7 — Ajoncourt (Moselle) — Sous-sol	1,2	36,2	26,5	23,3	9,8	3	0
8 — Le Robinet — Sol battant près de Bey/Seille (Meurthe-et-Moselle)	0,6	21,8	39,3	33,5	3	1,8	0
9 — Malacourt (Moselle) — Sol battant	1,4	18,8	41,1	32,3	3,1	3,3	0
11 — Ile d'Elle — « Bri » des Marais de Vendée	1,0	56,0	30,8	9,6	0,3	0,2	2,1
12 — Saint-Georges — Sol battant près de Nantes.....	2,6	16,4	41,1	7,7	20,5	11,6	0
13 — Belle Étoile — Sol sablo-limoneux (Loire-Atlantique).	1,8	6,5	10,7	40,1	11,7	29,2	0

Terres en expérimentation

Nous avons réalisé ce travail sur des échantillons couvrant une large gamme de granulométries. Certains d'entre eux, utilisés dès le début de nos essais, étaient en quantité insuffisante. Au fur et à mesure que la nécessité de nouvelles déterminations s'imposait, ces échantillons ont été épuisés. Ils n'ont donc pu subir la totalité des expériences.

En fait, trois séries de terres ont été soumises aux essais. La première contenait trois échantillons dont les caractères physiques sont résumés tableau 2. Elle nous a permis d'énoncer une hypothèse de travail et de dégager les principaux aspects des mécanismes de dégradation structurale.

Une deuxième série de 3 échantillons nous a servi à préciser ces mécanismes. Enfin, grâce à la troisième série, la plus nombreuse, nous avons pu confirmer leur caractère général.

Nous avons résumé tableau 4 les renseignements concernant les terres de ces deux dernières séries.

Confirmation du phénomène d'éclatement

Reprenant le schéma de YODER, HÉNIN a réalisé une série de manipulations faisant apparaître l'importance de la quantité d'air retenue à l'intérieur des agrégats. C'est ainsi que la stabilité croît notablement lorsque les particules sont imbibées sous vide. Inversement, si l'humectation est réalisée sous pression, le pourcentage d'agrégats stables diminue par rapport à celui obtenu en opérant à la pression atmosphérique. Ces résultats sont résumés dans le tableau 5.

TABLEAU 5

Pour cent d'agrégats stables obtenus après humectation dans une atmosphère à la pression de :
(d'après HÉNIN — *Plant and soil*, 1947, n° 8)

	0,01 at.	0,25 at.	1 at.	3 at.
Sablière Horizon B	32	19	10	6
Limon rouge	76	51,5	18	4
Versailles : sol cultivé	62,5	44,0	20	7
Versailles : forêt (Horizon A) ...	—	85	63,5	40
Sol : Station Clermont-Ferrand ..	—	—	94	90

De même, des agrégats imbibés avec précaution par capillarité présentent une stabilité supérieure à des agglomérats du même échantillon mouillés brutalement. En procédant ainsi, une certaine quantité d'air est chassée avant son emprisonnement par les ménisques liquides.

Enfin, pour une même terre, un échantillon prélevé humide c'est-à-dire dont une partie de l'air inclus dans les pores a été remplacé par de l'eau, donne, à l'analyse d'agrégats un pourcentage d'agrégats stables plus grand qu'un échantillon prélevé à l'état sec.

Reprenant le principe des manipulations effectuées par HÉNIN, nous avons réalisé l'imbibition sous vide des terres par l'eau et certains des liquides de traitement choisis. De plus, pour plusieurs échantillons l'imbibition a été effectuée dans des enceintes à vide partiel (de 0,02 à 1 atmosphère).

Les particules terreuses déposées dans des béchers sont placées en atmosphère raréfiée durant plusieurs heures. Le liquide de traitement préalablement dégazé, est alors introduit par aspiration dans l'enceinte et canalisé dans les béchers grâce à une boîte distributrice. Le contenu des béchers est ensuite tamisé de la même manière que pour la réalisation du test en présence d'air, après avoir été abandonné durant 30 minutes.

Dans tous les cas, l'imbibition sous vide entraîne une augmentation de stabilité par rapport à la même manipulation sous pression atmosphérique (tabl. 6).

TABLEAU 6

Pour cent d'agrégats restés stables après humectation en présence d'air et sous vide

	Terre n°									
	1	2	3	5	6	7	9	11	12	13
Humectation à l'air	10,5	7,5	54,5	78,5	72	51,5	30,8	31	19,7	21
Humect. sous vide..	44	28	63,5	87	83	82,5	79,5	52	40	43,5

Sous vide partiel, l'influence de la quantité d'air se traduit par une augmentation constante du taux d'agrégats stables avec le vide réalisé (fig. 4).

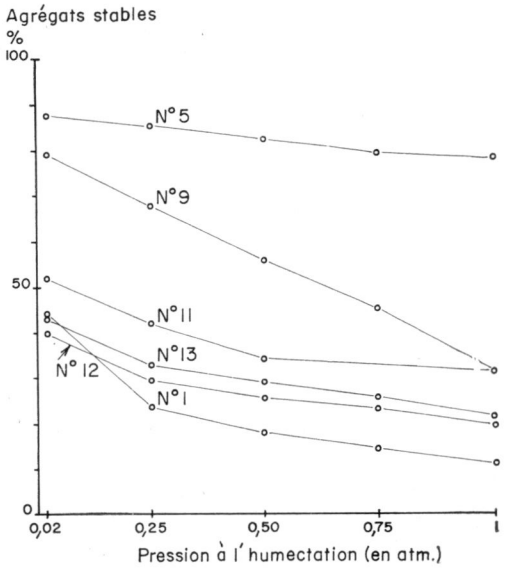


FIG. 4. — *Effets de l'humectation sous vide partiel sur le pourcentage d'agrégats stables*

Ainsi, non seulement l'hypothèse de la prédominance de l'éclatement dans la destruction structurale se trouve appuyée par ces résultats, mais l'on peut de plus constater le rôle considérable joué par la quantité d'air emprisonné à l'intérieur des agrégats dans l'intensité du phénomène.

Remarquons cependant que les courbes représentant le pourcentage d'agrégats stables en fonction des conditions de pression au moment de l'imbibition ne présentent pas toutes la même allure. Les phénomènes d'abrasion en cours de tamisage déjà signalés entrent, certes, en jeu mais ce fait traduit également des variations importantes dans la sensibilité à l'action de la quantité d'air inclus selon les terres.

Le taux d'agrégats stables mesuré pour la terre n° 9 (fig. 4) s'accroît considérablement par l'imbibition sous un vide partiel peu important. Par contre, le taux d'agrégats stables mesuré pour la terre n° 12 dans les mêmes conditions n'est que faiblement supérieur à celui mesuré par imbibition sous la pression atmosphérique.

Ces comportements très différents sont vraisemblablement liés à l'architecture même du matériau et particulièrement à la répartition de la porosité.

CHAPITRE II

ACTION DE LA VISCOSITÉ

Résultats expérimentaux

Grâce aux manipulations effectuées sur la première série de 3 terres, nous avons pu constater une augmentation importante du pourcentage d'agrégats stables lorsque la viscosité des solutions de traitement est accrue.

Afin de vérifier s'il s'agit là d'un phénomène général, nous avons effectué des analyses d'agrégats sur les deux autres séries d'échantillons.

Nous avons opéré dans des solutions de saccharose de plus en plus concentrées, c'est-à-dire de viscosité croissante. Les concentrations en poids de 20 p. 100, 40 p. 100, 50 p. 100 et 55 p. 100, correspondaient, pour les températures auxquelles nous avons travaillé à des viscosités de 1, 7, 5, 4, 14 et 24 centipoises.

Les résultats de ces manipulations sont présentés figure 5 sous forme de graphiques. Ils permettent de constater une augmentation très nette de la stabilité des agrégats pour des concentrations croissantes de saccharose et ceci pour toutes les terres en traitement.

Le phénomène apparaît quelle que soit la quantité d'air retenue à l'intérieur des agrégats. Nous avons en effet, pour plusieurs terres procédé à la même expérience en assurant l'imbibition dans une enceinte maintenue à une pression de 0,02 atmosphère. La faible quantité d'air résiduel diminue alors l'importance de l'éclatement, mais l'augmentation de viscosité des solutions conserve les mêmes effets (fig. 5).

Mécanisme de l'effet viscosité

Lorsque l'on utilise comme liquides de traitement des solutions de saccharose en remplacement de l'eau pure, l'atmosphère interne de l'agrégat n'est pas modifiée. En effet, l'addition de sucre n'affecte pas la tension de vapeur de l'eau. Nous avons d'autre part vérifié qu'elle n'entraîne pas de conditions d'hydratation différentes et telles que le diamètre des pores à l'état humide et par là, la pression capillaire en soient affectés. En effet, des mesures de gonflement effectuées sur mottes après imbibition par l'eau et par des solutions de saccharose ont donné des résultats identiques. Elles montrent bien que les conditions d'hydratation ne sont aucunement modifiées. De plus on sait que l'addition de saccharose à l'eau ne provoque pas de changements

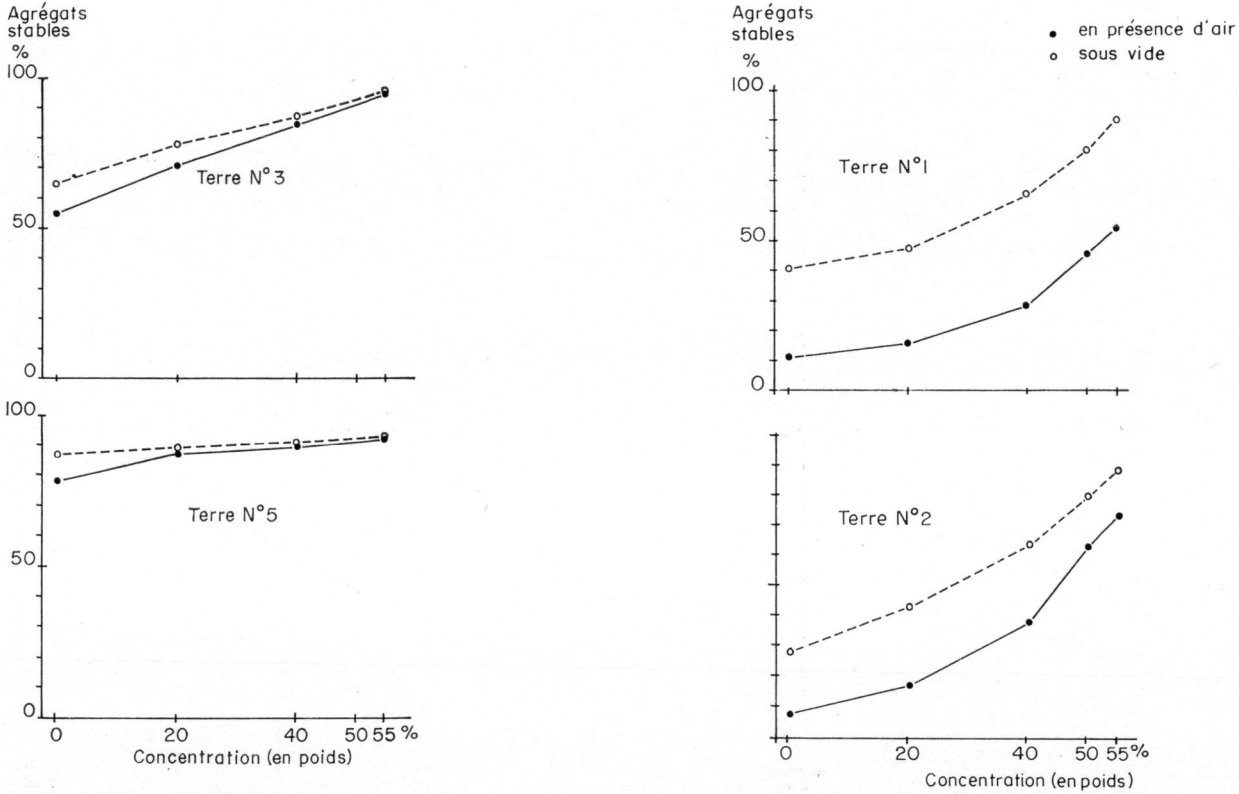
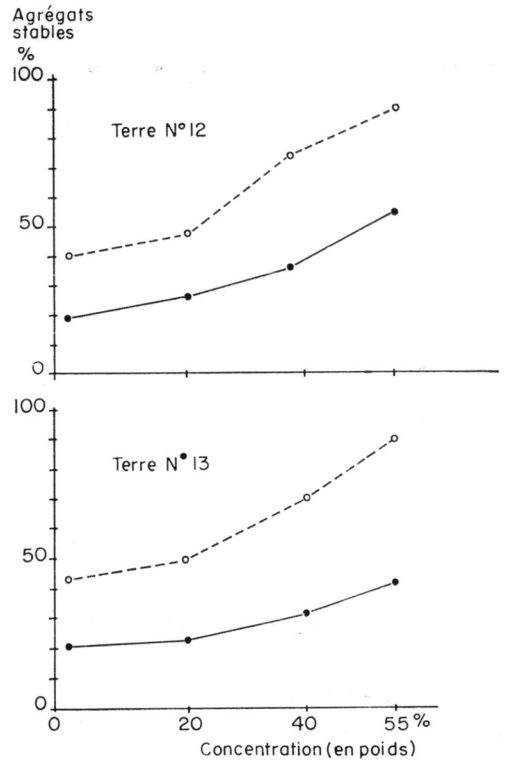


FIG. 5. — *Influence de la concentration de solutions de saccharose sur le taux d'agrégats stables, l'imbibition étant réalisée à l'air et sous atmosphère raréfiée*


Agrégats stables %
100
50
0
Terre N°12
Terre N° 13
0
20
40
55%
Concentration (en poids)

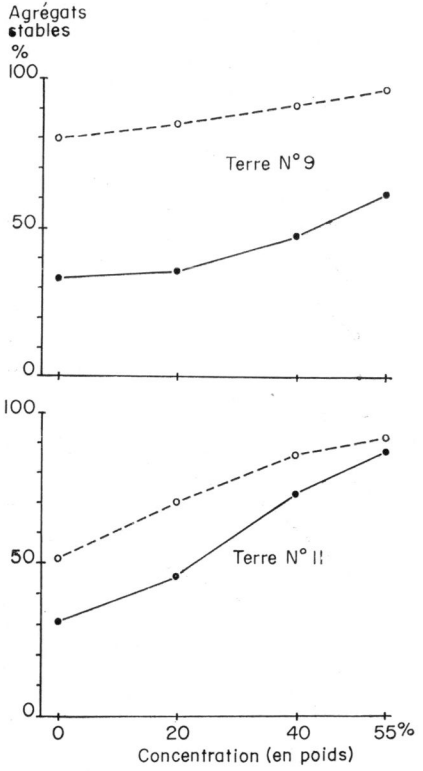

Agrégats stables %
100
50
0
Terre N°9
Terre N° 11
0
20
40
55%
Concentration (en poids)

FIG. 5. — *(suite)*

notables de tension superficielle. En conséquence il est possible de conclure à l'égalité des forces capillaires lorsque, pour une même terre, des solutions sucrées ou de l'eau pure sont utilisées comme liquides de traitement.

Les résultats des manipulations effectuées à l'aide de solutions sucrées permettent donc d'enregistrer les effets entraînés par la seule variation de viscosité. A travers ces effets, ils permettent aussi de mettre l'accent sur les aspects dynamiques du phénomène.

En effet, les solutions visqueuses pénètrent moins rapidement que l'eau à l'intérieur des pores du sol. D'autre part, la surface de l'agrégat est elle-même mouillée plus lentement, tous les pores n'étant pas obstrués simultanément.

Les ménisques liquides, jouant le rôle de pistons, repoussent et compriment l'air inclus, comme dans le cas du traitement par l'eau. Mais ce mouvement est plus progressif et permet vraisemblablement à l'air de s'écouler en quantité plus importante par les pores non obstrués.

Or la pression maximale à laquelle cet air est soumis dépend à la fois de la vitesse d'avancement des ménisques et des possibilités d'échappement. Donc, si l'on travaille sur un même matériau, c'est-à-dire avec une même quantité d'air initiale et une même répartition des pores dans leur forme et leurs dimensions, la pression interne maximale sera moins importante lorsque les agrégats sont traités par des solutions visqueuses que lorsque le liquide de traitement est de l'eau pure.

Là encore, l'observation directe confirme l'interprétation théorique.

Nous avons en effet déjà noté le chapelet de bulles d'air s'échappant des agglomérats avant l'éclatement lorsque ceux-ci sont plongés dans l'eau.

Si l'on effectue cette expérience en remplaçant l'eau par des solutions visqueuses de saccharose, la même remarque peut être effectuée mais la vitesse d'échappement des bulles est beaucoup plus réduite. Cela montre bien que l'air est repoussé moins violemment que dans le cas d'une imbibition par l'eau et qu'il dispose donc d'une durée plus importante pour s'échapper.

On peut illustrer ce phénomène en comparant ses effets à ceux provoqués par l'avancement d'un piston dans un cylindre dont une extrémité fermée est percée d'un trou. Si le piston est repoussé très rapidement, l'air inclus est fortement comprimé bien qu'il puisse s'échapper en partie. Par contre, si le mouvement du piston est lent, la compression sera faible car l'air dispose d'un temps plus long pour sortir du cylindre.

Si l'on admet qu'un tel phénomène régit le comportement des agrégats, il est possible de l'illustrer par une représentation graphique (fig. 6).

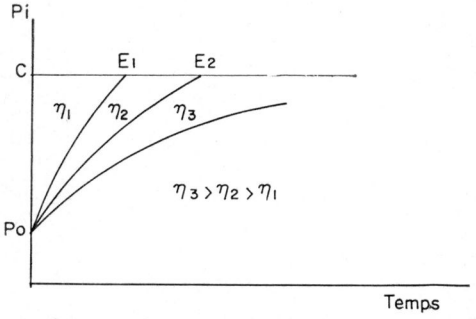


FIG. 6. —*Effets de la viscosité des solutions sur l'établissement de la pression interne maximale*

Un liquide peu visqueux (η 1) pénètre rapidement dans les pores. Seule une faible partie de l'air inclus peut s'échapper. L'éclatement a lieu en E_1 lorsque P_i atteint une valeur égale à la cohésion C de la terre humide.

Par contre, si la vitesse d'imbibition est lente (liquide de viscosité η 3), l'air inclus peut se maintenir à une pression inférieure à la pression critique de rupture, car, en grande partie, il aura pu s'évacuer.

Enfin, la pression critique peut n'être atteinte que lorsque l'agrégat est presque totalement humecté. La rupture (en E_2) n'intéresse alors qu'une partie de l'agrégat. Il ne s'effectue qu'un éclatement partiel.

Nécessité de vérifications

L'effet de la viscosité des solutions de traitement est nettement mis en évidence grâce aux manipulations qui précèdent. Cependant nous n'avons travaillé qu'avec des solutions de saccharose qui, nous l'avons vu, n'entraînent par rapport à l'eau pure, des modifications ni dans les conditions d'hydratation, ni dans les tensions capillaires développées.

Il faut maintenant vérifier si la viscosité est seule en cause ou si d'autres facteurs interviennent dans le déroulement des mécanismes. Pour cela, ainsi que nous le verrons au chapitre III, nous avons choisi d'utiliser des liquides de traitement tels que des modifications d'autres caractères physico-chimiques accompagnent les variations de viscosité.

Ann. agron., 1967, **18** (1), 91-93.

CHRONIQUE DES LIVRES

SURUGUE (J.). — TECHNIQUES GÉNÉRALES DU LABORATOIRE DE PHYSIQUE. Vol. 4. — Paris, Centre national de la Recherches scientifique, 1966, 2e éd., 569 p.

Cette 2e édition, revue et complétée, du volume 4 des *Techniques générales du laboratoire de physique*, publiée sous la direction de J. SURUGUE, contient les chapitres suivants :

— Les semi-conducteurs, par M. COAT.

— Mesures et production des impulsions électriques de grande amplitude par MM. C. GARY et G. RIVET.

— Technique des basses températures par A. LACAZE.

— Les matières plastiques par G. DIXMIER et M. CHATAIN.

— Les colles par G. DIXMIER et Mlle L. DOUSSIN.

— La documentation dans les sciences physiques par J. GARRIDO.

TRÉMOLIÈRES (J.). — BIOLOGIE GÉNÉRALE, t. I, Bases physico-chimiques. — Paris, Dunod, 444 p., 1966.

L'auteur, actuellement directeur du laboratoire de nutrition humaine de l'I.N.S.E.R.M., a réuni dans ce manuel l'essentiel des connaissances qui sont à la base de la biologie, celle-ci étant traitée comme l'application de la physico-chimie à la cellule et à l'être pluricellulaire.

L'ouvrage comporte les bases physico-chimiques de la biologie. La chimie des molécules biologiques est limitée à l'indispensable : propriétés caractéristiques des éléments, des fonctions et des familles de molécules. Les formes de l'énergie mise en jeu dans la cellule sont présentées en images, abordables à qui n'est pas initié à la thermodynamique. Les lois des états physiques : solutions, enzymes, membranes, dont l'organisation crée les organites cellulaires, sont ramenées aux schémas qui les expliquent et aux formules nécessaires pour les appliquer. Les grands métabolismes sont présentés en schémas. La dernière partie expose les méthodes générales par lesquelles on étudie un tissu vivant : morphologie, dosages de constituants et de leur activité, isolement des organites cellulaires, étude de leur capacité fonctionnelle. Des problèmes et exercices sont donnés avec leurs solutions après les principaux chapitres.

Ce manuel sera utile à ceux qui, élèves, praticiens ou professeurs des secteurs appliqués de la biologie, ont besoin de comprendre les processus physico-chimiques et biologiques élémentaires à la base de leurs techniques ou de leurs spécialités.

DEVLIN (R. M.). — PLANT PHYSIOLOGY. — Reinhold Publishing Corporation, New York, 1966, 564 p.

Un livre traitant d'un sujet en pleine évolution et aussi vaste que la physiologie végétale aurait pu noyer dans les détails les processus fondamentaux de la physiologie, mais le Professeur DEVLIN, réussit, en sept chapitres clairs, concis et abondamment illustrés, à les mettre en évidence pour les étudiants.

Des chapitres importants sont consacrés à la photosynthèse, la nutrition minérale et la régulation de la croissance des plantes, en tenant compte des dernières découvertes dans ce domaine.

Chaque chapitre est terminé par une longue liste de références bibliographiques dont la consultation complètera les connaissances que l'étudiant désire acquérir.

J. L.

SCHLICHTING (E.), BLUME (H. P.). — BODENKUNDLICHES PRAKTIKUM (Manuel de Pédologie pratique). — Berlin, P. Parey, 1966, 209 p.

Le but de ce manuel est d'étudier de façon pratique les principaux problèmes de la pédologie.

Il donne un aperçu des bases, de la technique et de l'évaluation des méthodes de recherche en pédologie. Il est divisé en trois parties : la première traite des études en place qui peuvent être réalisées par des méthodes accessibles à tous. Les secondes et troisième parties développent en laboratoire, par des méthodes plus complexes, les études faites sur le terrain.

L'interprétation des données occupe une place importante. Dans la première partie, l'accent est mis sur la reconstitution de l'évolution des profils et sur la caractérisation des facteurs écologiques. Puis après de nombreux calculs et représentations des données d'analyse, on caractérise en laboratoire la direction, l'intensité et la durée des processus de formation du sol ainsi que sa perméabilité aux racines, son économie en eau, en air et en substances nutritives. Ces auteurs ont adjoint un chapitre sur les mesures de mise en valeur et d'amendement qu'il convient d'appliquer. Toutes ces données sont illustrées à l'aide d'exemples concrets.

Ce livre ne s'adresse pas uniquement aux agriculteurs et aux sylviculteurs, mais également aux biologistes et aux géographes pour les initier aux pratiques de la pédologie.

L. de B.

BARTHOLOMEW (W. V.), CLARK Francis (E.). — SOIL NITROGEN. — Madison, American Society of Agronomy, Ser. *Agronomy*, nº 10, 1965, 615 p.

Les 16 chapitres que comporte cette importante monographie sur l'azote du sol ont été rédigés par les spécialistes les plus compétents d'Europe, d'Australie et d'Amérique. Les sujets traités couvrent tous les aspects, microbiologiques, chimiques et agronomiques, soulevés par l'étude du métabolisme de l'azote dans le sol et de son utilisation par les plantes. Chaque exposé est complété par une importante bibliographie aux références les plus récentes. Cet ouvrage est d'une inestimable ressource pour tous les chercheurs de la Science du Sol qui s'intéressent au problème de l'azote dans le Sol.

Les titres et auteurs de chacun des chapitres sont les suivants :

1. — Origine et distribution de l'azote du sol. STEVENSON F. J. (17 p.).
2. — Azote minéral du sol. HARMSEN G. W. et KOLENBRANDER G. J. (28 p.).
3. — Azote organique des sols. BREMNER J. M. (39 p.).
4. — Adsorption des composés azotés minéraux par les constituants du sol. MORTLAND M. M. et WOLCOTTAR (42 p.).
5. — Fixation de l'ammonium et autres réactions impliquant une immobilisation non enzymatique de l'azote minéral du sol. NOMMIK H. (51 p.).
6. — Chimie physique et chimie biologique des complexes argile minérale, azote organique. MCLAREN et PETERSON G. H. (21 p.).
7. — Minéralisation et immobilisation de l'azote dans la décomposition des résidus de plantes et d'animaux. BARTHOLOMEW W. V. (15 p.).
8. — Nitrification. ALEXANDER M. (26 p.).
9. — Dénitrification. BROADBENT F. E. et CLARK F. (11 p.).
10. — Fixation symbiotique de l'azote. NUTMAN P. S. (16 p.).
11. — Fixation de l'azote par les légumineuses et milieu environnant. VINCENT J. M. (25 p.).
12. — Fixation non symbiotique. JENSEN H. L. (36 p.).
13. — Disponibilité de l'azote. SCARSBROOK C. E. (15 p.).
14. — Besoin de la plante en azote et utilisation. VIETS Frank G. Jr. (40 p.).
15. — Mouvement de l'azote dans le sol. GARDNER W. R. (17 p.).
16. — Bilan de l'azote du sol. ALLISON F. E. (28 p.).

R. B.

KONONOVA (M. M.). — SOIL ORGANIC MATTER. ITS NATURE, ITS ROLE IN SOIL FORMATION AND IN SOIL FERTILITY. — The Academy of Sciences of the U. S. S. R., The V. V. DOKUCHAEV Soil Institute. Oxford, Pergamon Press, 2nd revised and enlarged, 1966, 544 p.

Cette deuxième édition est une mise à jour complète de la première dont le texte original datait de 1958.

L'auteur a utilisé des données de la littérature jusqu'à 1965 et porte le nombre de références de 900 à environ 1 400. En particulier les travaux occidentaux sont beaucoup plus fréquemment cités.

Le chapitre 2 sur la composition de la Matière Organique du sol et la nature des substances humiques a été complété par les travaux récents.

Le troisième, relatif à la Biochimie de la formation de l'humus est entièrement remanié : des paragraphes sur le rôle des tannins, des enzymes, de la microflore, ont été ajoutés.

« L'importance de la matière organique dans la formation et la fertilité du sol » (chap. 4) a été également complété : rôle dans la formation des profils, formes de liaisons entre matière organique et minéraux. Effet des substances humiques sur la croissance et le développement.

Enfin les « Méthodes d'investigation » qui n'avaient droit qu'à une annexe dans l'édition précédente font la matière d'un 8e chapitre divisé en 3 parties :

— Contenu total et composition de l'humus des sols minéraux.
— Nature de l'humus (groupes fonctionnels, fractionnement, spectroscopie infrarouge).
— Dynamique de la matière organique dans le sol.

En résumé une véritable « réédition », largement complétée et mise à jour, mieux équilibrée que la première, fait de cet ouvrage un document fort utile dans l'étude de la matière organique des sols.

J.-R. H.

THE STATE AND MOVEMENT OF WATER IN LIVING ORGANISMS. Symposium de la Société de Biologie expérimentale. Swansea du 8-12 sept. 1964. — Cambridge, University Press, 1965, 432 p.

La diversité des articles réunis dans cet ouvrage le rend difficile à résumer. Nous n'insisterons que sur les articles qui nous ont paru les plus originaux ou fondamentaux.

Cet ouvrage est divisé en trois grands chapitres :

I — *Les bases physiques* : 6 communications

Dans la première partie, l'accent est mis sur la théorie cinétique de l'eau et ses caractéristiques de structure, ainsi que sur les modifications qu'elles subissent au voisinage de parois ou en présence de substances dissoutes. Dans les cellules (BERNAL), l'existence du réticulum endoplasmique entraîne la distinction de trois types d'eau aux propriétés différentes en fonction de la localisation :

— eau vacuolaire, aux propriétés voisines de celles de l'eau libre,
— eau cytoplasmique, se subdivisant en :
● eau endoplasmique, constituant l'essentiel du cytoplasme, et très différente de l'eau libre,
● eau réticulaire ou endolymphe, en contact avec le côté « lisse » du réticulum, et communiquant avec le milieu extérieur.

Dans deux communications très intéressantes concernant la perméabilité cellulaire, KEDEM et DAINTY développent à partir de la thermodynamique des processus irréversibles, les équations du transfert de l'eau et des substances dissoutes à travers les membranes. Différentes hypothèses sont étudiées en ce qui concerne la nature des membranes simples ou stratifiées et celle des forces agissant sur le déplacement (transport passif ou actif).

Le lecteur familier du langage de la thermodynamique des processus irréversibles peut trouver dans ces deux articles une méthode d'approche fructueuse dans l'étude des phénomènes vitaux faisant intervenir ce type de mouvements.

II — *L'eau dans la plante* : 7 communications

Cette deuxième partie envisage les différents aspects du trajet de l'eau entre le sol et l'atmosphère par l'intermédiaire de la plante.

Les deux premières communications ont un intérêt général et donnent, sans grande originalité, les mécanismes physiques essentiels.

Pour l'étude de l'eau dans la plante, l'article de WEATHERLEY nous a paru très intéressant en ce qu'il reprend les définitions des termes de pression osmotique ou de turgescence et qu'il discute la validité des différentes méthodes que nous avons de les mesurer. Il semble qu'une des principales causes des erreurs et des divergences existant entre ces méthodes, provienne de l'eau des parois cellulaires dont l'importance est généralement sous-estimée. Appuyé par un certain nombre de références bibliographiques, il propose également l'hypothèse d'une circulation ascendante de l'eau dans la plante, s'effectuant principalement par les parois cellulaires, la circulation descendante ayant lieu par l'intermédiaire du cytoplasme et des vacuoles.

La dernière phase du trajet sol-atmosphère est abordée dans l'article fondamental de MONTEITH. Nous y trouvons une description mathématique de la transpiration végétale considérée sous l'angle physique, à l'échelle de la feuille et du couvert végétal. Les calculs sont développés d'une manière assez nouvelle et conduisent notamment à définir une valeur particulière de la résistance qu'offre une surface à l'évaporation, au-delà de laquelle l'évaporation devient une fonction décroissante de la vitesse du vent. Ce phénomène peut avoir des conséquences importantes s'il se produit couramment dans les conditions naturelles, conduire à des interprétations nouvelles des relations entre les plantes et le climat et particulièrement de l'action des brise-vent.

III — *L'eau dans l'animal* : 9 communications

Cette troisième et dernière partie nous a paru également très intéressante et se conformer comme les précédentes au même souci d'analyser les phénomènes d'un point de vue physique aussi rigoureux que possible.

A. D.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviation, ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : DUPONT et DUVAL (1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatres langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N .R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communication personnelle » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles (France). On demande deux exemplaires.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 18 1967 NUMÉRO 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, Paris-7e

NOTICE NÉCROLOGIQUE

Georges JORET (1884-1966)

Le 27 juillet dernier, Georges JORET est décédé à Amiens. Il s'est éteint à quatre vingt et un ans, entouré de l'affection de siens et de l'amitié respectueuse de tous ceux qui l'ont connu.

JORET fut un des meilleurs agronomes de sa génération et l'I. N. R. A. perd en lui un de ses pionniers.

Né à Luçon en 1884, Ingénieur agronome en 1908, il entra, dès sa sortie de l'Institut agronomique, comme préparateur à la Station agronomique de l'Yonne, alors dirigée par ROUSSEAUX.

Nommé Chef de Travaux, il passa en 1924 le concours de Directeur de la Station départementale d'Amiens, où il succéda à CROCHETELLE. Il y resta trente ans, puisque, mis à la retraite en 1950, il continua à assumer ses fonctions jusqu'en 1954.

Dans plus de 220 notes, il étudia les différents aspects de l'agriculture du Nord de la France et particulièrement de celle de la Somme.

Les travaux de JORET dépassèrent rapidement les frontières de la Somme et cela fut pour lui l'occasion de multiples charges : Membre des Comités scientifiques de l'I. T. B., des Engrais Composés, des Méthodes d'Analyses des Engrais, des Aliments du Bétail, des Experts chimistes, etc...

Dans toutes ces fonctions, sa compétence et sa courtoisie étaient appréciées de ses Collègues.

Les consécrations officielles ne lui manquèrent pas. Lauréat de la Société d'Encouragement à l'Industrie nationale dès 1911 et de l'Académie d'Agriculture en 1930, il devint Correspondant de cette Académie en 1935 et Membre non résident en 1953.

C'est à cette époque que l'Académie des Sciences reconnaissant la valeur de ses recherches, le nomma Membre Correspondant.

Officier d'Académie et du Mérite agricole, JORET était également Officier de la Légion d'Honneur.

Peut-être la Recherche agronomique est-elle appelée, du fait de son développement, à prendre des directions différentes de celles d'autrefois. Mais les Jeunes qui s'y consacrent actuellement, ne doivent pas oublier que ce sont nos Anciens, comme JORET, qui ont rendu ce développement possible en démontrant l'utilité et l'efficacité de l'I. N. R. A.

Pierre BOISCHOT.

Désireuse de rendre hommage à la mémoire de M. JORET, la Rédaction des *Annales agronomiques* est heureuse de publier ces quelques lignes écrites par M. Pierre BOISCHOT, ancien Rédacteur en Chef, et qui retracent l'essentiel de la carrière de celui qui fut l'un de ses plus fidèles et de ses plus éminents collaborateurs.

S. HÉNIN.

Ann. agron., 1967, **18** (2), 99-144.

ÉTUDE DES MÉCANISMES DE LA DESTRUCTION DES AGRÉGATS DE TERRE AU CONTACT DE SOLUTIONS AQUEUSES (1)

J. CONCARET

avec la collaboration technique de G. RUNSER

Station agronomique, 89 - Auxerre

Nous avons constaté dans une première partie qu'il était nécessaire quand on utilise comme modèle de stabilité le phénomène d' « explosion », de considérer la façon dont l'air est emprisonné, ce qui fait intervenir la viscosité. Ce même modèle dynamique doit faire intervenir tous les facteurs intéressant la vitesse de pénétration de l'eau auxquels viendra s'ajouter l'action de l'eau ou des solutions sur la cohésion.

Nous étudierons dans cette seconde partie l'influence de ces grandeurs sur le phénomène.

---

(1) La première partie de ce mémoire a paru dans le n°1/1967 des Annales agronomiques.

CHAPITRE III

INTERVENTION DE LA VITESSE D'HUMECTATION

Analyses d'agrégats dans des solutions salines

Si l'on utilise des sels minéraux comme solutés, la plupart des propriétés physico-chimiques de la solution varient avec la concentration. Simultanément sa viscosité croît. Nous avons tracé figure 7 les courbes rendant compte de cet accroissement pour des solutions de chlorure de sodium, magnésium et calcium en les comparant à celles obtenues pour des solutions de saccharose.

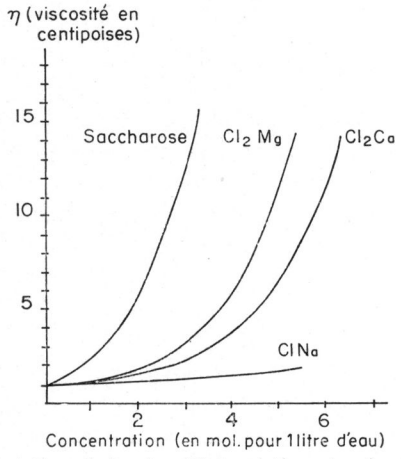


FIG. 7. — *Variations de la viscosité de solutions de sels et de saccharose en fonction de leur concentration*

Bien que nettement moins importante pour les solutions salines que pour les solutions de saccharose, l'augmentation de viscosité en fonction de la concentration reste notable.

L'action du facteur viscosité de la solution de traitement sur le pourcentage d'agrégats stables devrait donc apparaître en utilisant à diverses concentrations, des solutions de sel.

Nous avons effectué l'analyse d'agrégats dans de telles solutions et représenté graphiquement (fig. 8) les variations du taux d'agrégats stables en fonction de la viscosité pour les terres des deux premières séries d'échantillons. Sur les mêmes graphiques, nous avons tracé les courbes régulières obtenues en traitant les mêmes terres par des solutions sucrées de viscosité croissante.

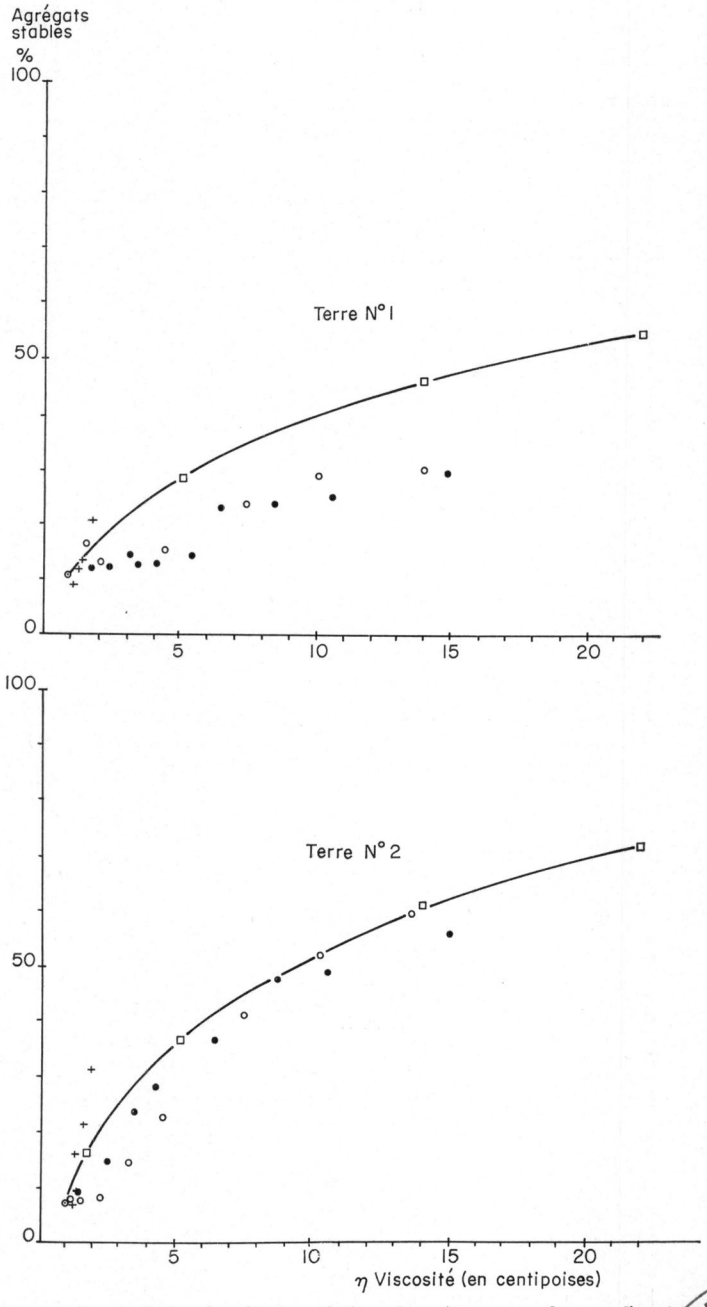


FIG. 8. — *Influence de la viscosité des solutions de traitement sur le taux d'agrégats stables*

⊙ Traitement par l'eau pure
□ " " des solutions de saccharose
● " " " " " $Ca\ Cl_2$
○ " " " " " $Mg\ Cl_2$
\+ " " " " " Na Cl

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE GRIGNON
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL

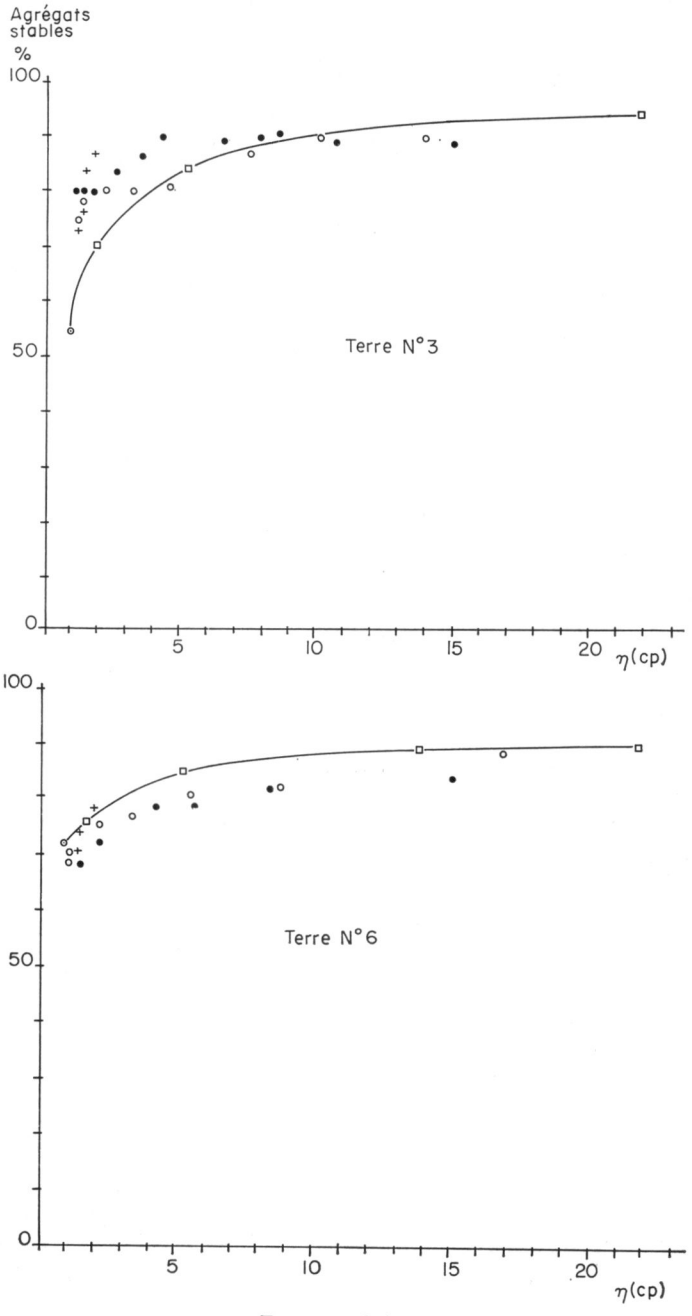

Agrégats stables
%
100
50
0
Terre N°3
5
10
15
20
η(cp)
100
50
0
Terre N°6
5
10
15
20
η(cp)

FIG. 8. — *Suite.*

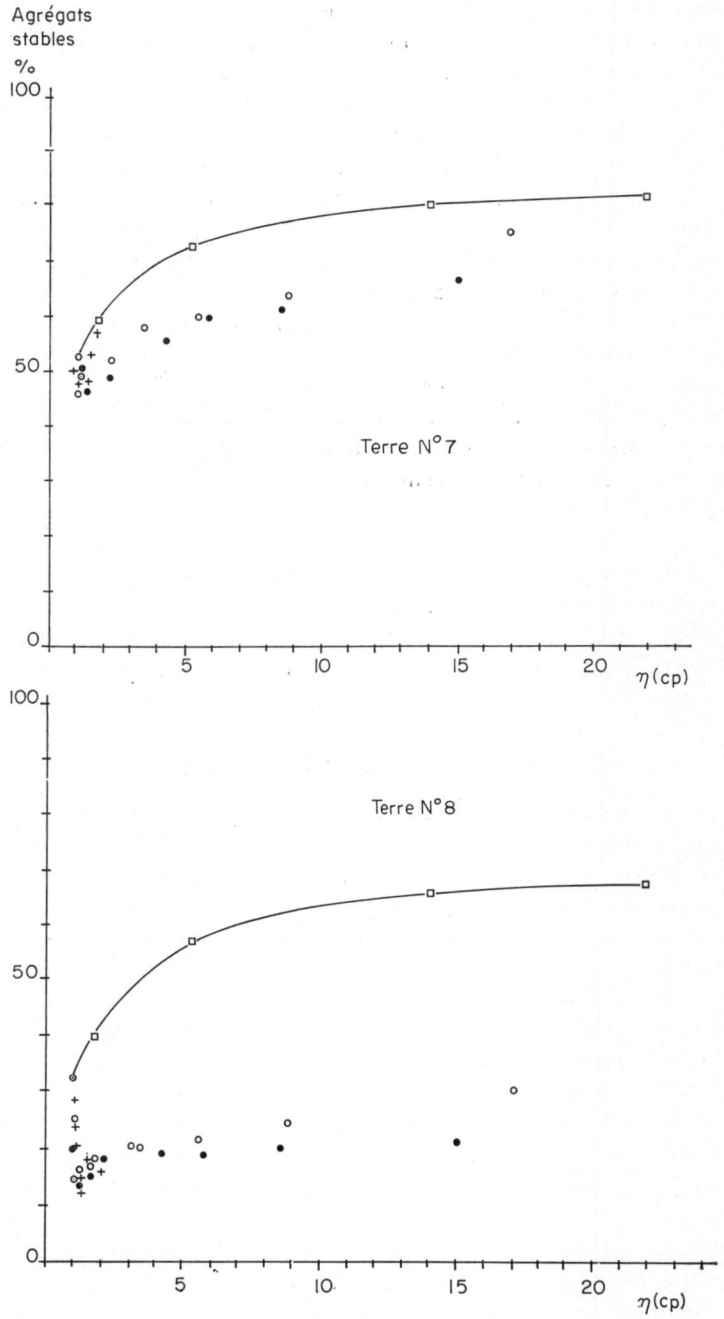


FIG. 8. — *Suite et fin.*

On voit que le taux d'agrégats stables subit effectivement d'importantes variations lorsque la viscosité des solutions salines utilisées augmente. Cependant, si pour les terres nos 2, 3 et 6, les points portés sur le graphique sont voisins de la courbe tracée grâce aux manipulations effectuées dans les solutions de saccharose, il n'en est pas de même pour les terres nos 1, 7 et 8, les points s'écartant alors notablement de cette courbe. Notons d'ailleurs que, pour une même viscosité, l'effet protecteur des solutions salines est le plus souvent inférieur à celui de la solution sucrée.

Le seul effet viscosité ne peut donc rendre compte du comportement des sols lorsque l'analyse d'agrégats est réalisée dans des solutions salines.

Or, lorsque l'on remplace l'eau pure par des solutions de saccharose de concentrations croissantes, nous avons signalé que la tension capillaire n'est aucunement modifiée. D'autre part, nous avons pu constater que ces solutions n'introduisent pas de modifications dans les conditions d'hydratation des particules de terre, c'est-à-dire comme nous le verrons plus loin, de leur cohésion.

Au contraire lorsque le liquide de traitement est une solution saline, un certain nombre de propriétés se trouvent modifiées par rapport à l'eau pure, par exemple la tension de vapeur et la tension superficielle. De plus, les échanges d'ions entre le sol et la solution peuvent changer sensiblement la réaction de la terre vis-à-vis de l'eau.

Les tensions capillaires à l'intérieur des pores et les conditions d'hydratation de la terre étant ainsi modifiées, la vitesse d'avancement des ménisques et les possibilités d'échappement de l'air inclus peuvent subir d'importants changements par rapport aux traitements par l'eau ou par les solutions sucrées. On peut s'attendre à ce que le mode d'établissement de la pression interne maximale soit très différent.

Temps nécessaire à l'humectation

Certaines des valeurs caractéristiques de la solution telles que la viscosité ou la tension superficielle peuvent être connues facilement par des mesures ou par des tables. Par contre, il est malheureusement très difficile d'apprécier des valeurs telles que l'angle de raccordement sol/liquide.

Cependant, l'action simultanée des différentes variables a comme effet une humectation plus ou moins rapide des agrégats. On peut donc, par une mesure du temps nécessaire à l'humectation par les différentes solutions obtenir une connaissance globale des effets entraînés par l'ensemble des facteurs en cause bien que ceux-ci ne puissent être mesurés séparément.

Dans ce but, nous avons réalisé dans des conditions identiques la mesure du temps nécessaire à l'humectation d'agrégats d'un même échantillon par les différents liquides. Cette notion de temps d'humectation a l'avantage de réunir les mêmes composantes que celles figurant dans l'expression théorique de P_i, y compris l'affinité sol/liquide.

Il est toutefois évident que ce test, s'il permet des comparaisons entre le comportement d'agrégats d'une même terre soumis à divers liquides ne saurait en aucun cas autoriser des confrontations entre plusieurs terres soumises aux mêmes traitements. En effet, la porosité totale de deux terres ainsi que la répartition des pores sont très différentes et entraînent des possibilités d'écoulement de l'air très dissemblables, toute comparaison étant ainsi interdite.

Pratiquement, nous avons réalisé ce test de la manière suivante :

Les agrégats (de même taille que ceux utilisés pour les autres tests) sont déposés sur une plaque poreuse humectée dans des conditions identiques pour chaque série d'expériences. Le temps nécessaire à l'imbibition de chaque agrégat est noté, le test étant effectué sur plusieurs dizaines de particules.

Pour une terre et pour un liquide d'imbibition, les mesures ainsi réalisées permettent l'obtention d'une moyenne représentative car elles sont extraites d'une population normale comme le prouve le calcul du critérium de Pearson.

Humectation par les solutions de traitement

Ce test a été appliqué aux terres en expérimentation en utilisant des solutions sucrées aux mêmes concentrations que celles dans lesquelles nous avons réalisé les tests de stabilité. Pour chaque terre, nous avons ensuite représenté graphiquement l'accroissement du taux d'agrégats stables en fonction du temps nécessaire à l'humectation. Ces graphiques ont été établis en coordonnées bilogarithmiques (voir fig. 9).

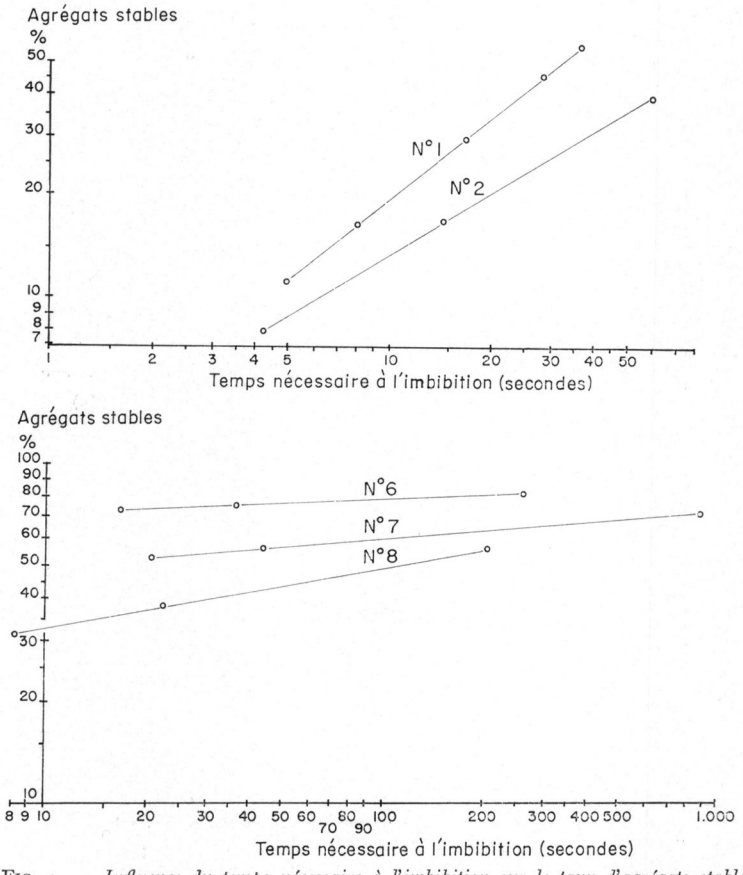


FIG. 9. — *Influence du temps nécessaire à l'imbibition sur le taux d'agrégats stables* (traitement par des solutions de saccharose)

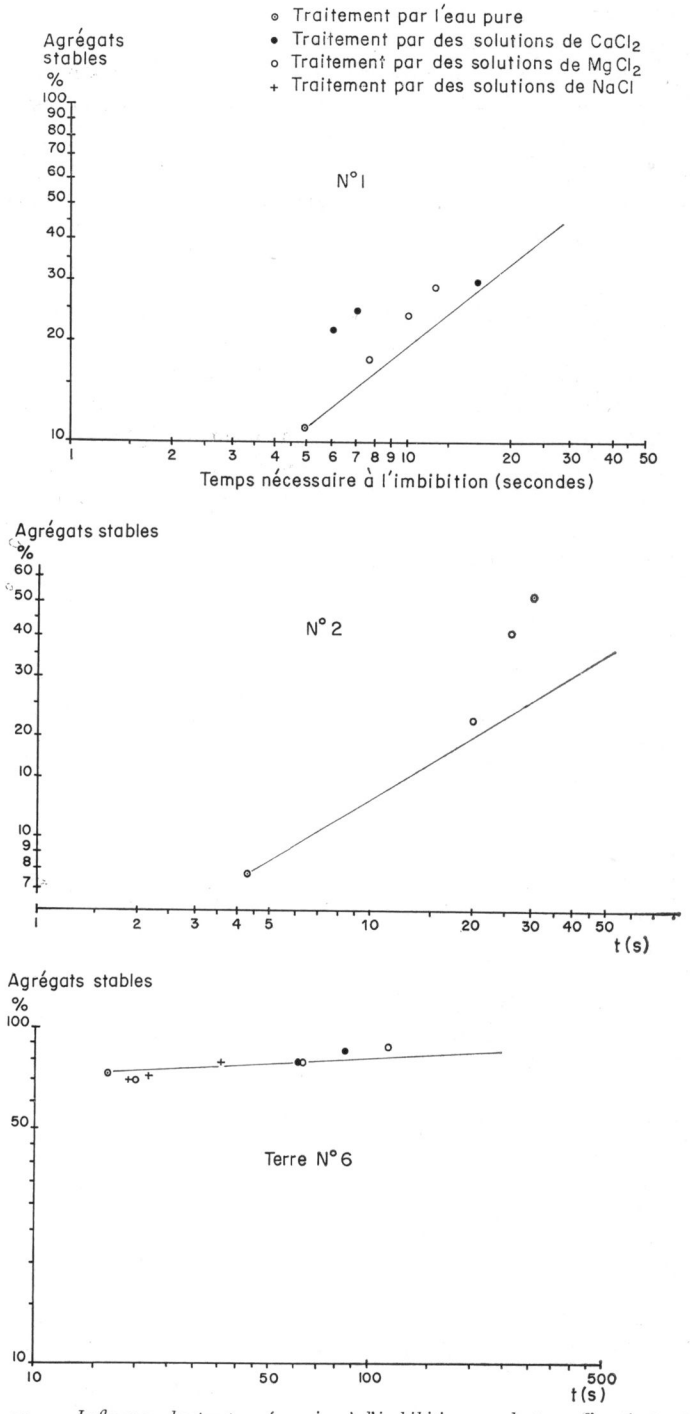


FIG. 10. — *Influence du temps nécessaire à l'imbibition sur le taux d'agrégats stables* (traitement par des solutions salines)

On voit qu'il est possible de faire passer pour chaque terre une droite par les points expérimentaux correspondants. Il semble donc bien qu'une relation lie la stabilité et la vitesse d'imbibition. Cependant chaque échantillon a ses caractères propres et en particulier une porosité et une répartition des diamètres de pores qui règlent la

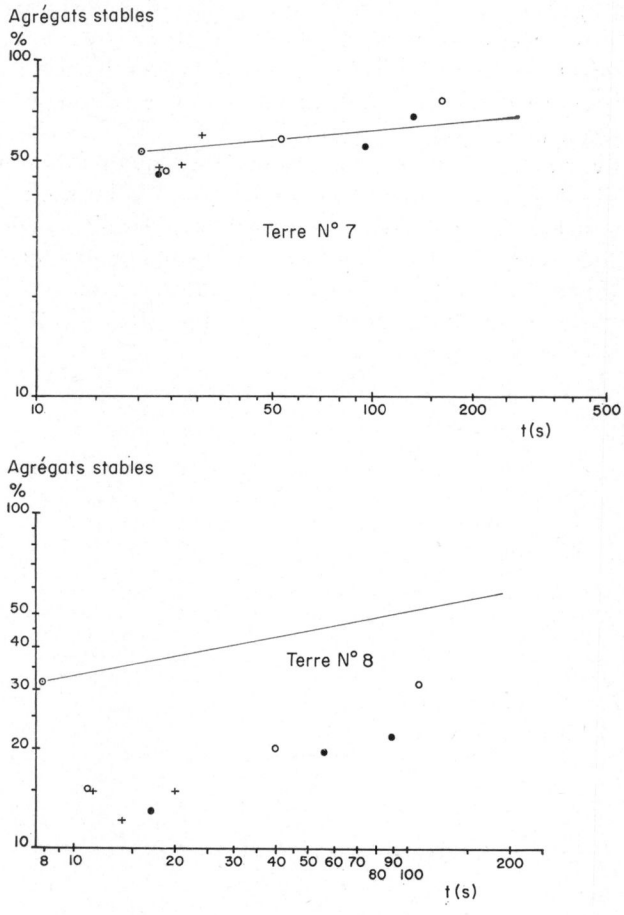


FIG. 10. — *Suite et fin.*

manière dont l'atmosphère interne est comprimée. C'est pourquoi chaque droite possède sa position et sa pente, traduisant certes l'existence d'une relation monotone entre le taux d'agrégats stables et la vitesse d'imbibition, mais cette relation tenant compte des caractères propres à chaque sol.

Nous avons également appliqué ce test à l'humectation des terres par certaines des solutions salines dans lesquelles ont été effectuées les analyses d'agrégats.

Dans la mesure où les conditions d'emprisonnement de l'air réglées par la vitesse d'humectation, entrent seules en jeu, les points correspondant aux traitements par ces solutions devraient se placer sur les courbes de la figure 9 obtenues en traitant par les solutions sucrées.

En effet, si cette hypothèse était exacte, pour un même temps nécessaire à l'humectation, c'est-à-dire pour des conditions d'emprisonnement de l'air identiques, les résultats de l'éclatement des agrégats devraient être les mêmes quelle que soit la solution qui le provoque.

Nous avons donc placé les points correspondant aux solutions salines sur les graphiques de la figure 9. On voit (fig. 10) que ces points s'écartent parfois notablement des droites tracées grâce aux solutions de saccharose.

Si pour les terres n°s 6 et 7 les différences sont faibles, les n°s 1 et 2 montrent déjà une divergence sensible entre les deux groupes de résultats et la terre n° 8 apparaît franchement aberrante.

Or nous avons remarqué précédemment que l'intervention de solutions salines introduit d'importantes variations dans les conditions d'hydratation de la terre. On peut alors s'attendre à ce que la cohésion de la terre humide soit très différente selon la nature du liquide d'imbibition et nous nous proposons d'examiner dans quelle mesure ce phénomène peut expliquer les écarts constatés entre les taux d'agrégats stables obtenus dans des solutions salines et dans des solutions sucrées entraînant le même temps nécessaire à l'imbibition.

CHAPITRE IV

LA COHÉSION

Mesure de la cohésion

En premier lieu, il est nécessaire de mettre en œuvre une technique susceptible de rendre compte des variations de cohésion.

La plupart des travaux antérieurs portant sur la cohésion des terres ne mentionnent que des mesures effectuées sur des terres se différenciant par leur teneur en argile et leur compacité sous l'effet de pétrissages préalables à l'état humide.

Or, il est bien évident que la rupture des agrégats intervient alors que la terre est déjà humectée. Ce sont donc des mesures de cohésion sur la terre humide qu'il est nécessaire de réaliser.

De plus, le façonnement en pâtons de la terre humide entraîne automatiquement de profonds changements dans la répartition des pores et, par là, dans les conditions de compression de l'atmosphère interne des particules de terre.

L'application de la méthode de travail que nous nous sommes fixée exige l'utilisation d'une technique telle que les mesures de cohésion soient réalisées sur des agrégats non modifiés et humides.

Cependant la disposition des éléments constitutifs du sol est très irrégulière ainsi d'ailleurs que la distribution des forces de liaison assurant la fonction des particules élémentaires aussi bien dans leur intensité que dans leur nature. On ne peut donc s'attendre à ce que les variations de cohésion en fonction de la taille suivent les lois de la similitude.

Dans ces conditions, il paraît très difficile sinon impossible de réaliser sur un tel matériel des déterminations ayant une valeur absolue. Il faut donc utiliser un test capable de donner au moins le sens et l'amplitude des variations de cohésion lorsqu'elle est artificiellement modifiée.

Nous avons retenu la mesure de la résistance à l'écrasement des agrégats. Celle-ci reste en effet sous la dépendance des forces de cohésion bien qu'il paraisse difficile de la relier à ces dernières par une relation mathématique, les agrégats ne se présentant pas sous des formes géométriques simples.

Mesure de la résistance à l'écrasement

La technique employée est la suivante :

Dans une enceinte sous vide, une plaque de porcelaine poreuse est maintenue saturée par le liquide de traitement. Dans la même enceinte, les agrégats sont disposés

dans un récipient situé au-dessus de la plaque. Une commande manuelle extérieure permet de verser son contenu sur cette plaque.

Le vide est maintenu plusieurs heures afin d'extraire des agrégats l'air qu'ils pouvaient renfermer. Les particules de terre sont alors répandues sur la plaque poreuse. L'humectation est ainsi réalisée dans des conditions limitant au maximum les risques d'éclatement. Afin d'assurer une imbibition complète, l'ensemble est abandonné pendant 12 heures.

Les agrégats sont alors déposés un à un sur le plateau d'une balance à lecture directe. A l'aide d'une butée mobile verticale et commandée par une vis molletée, des pressions croissantes sont exercées sur la particule de terre et apparaissent quantitativement sur l'échelle optique. On note l'effort correspondant à l'écrasement, celui-ci étant nettement marqué par la brusque variation de l'échelle de lecture (fig. 11).

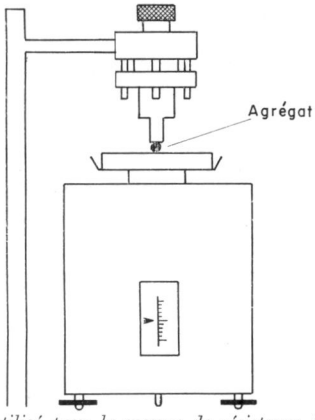


FIG. 11. — *Appareillage utilisé pour la mesure de résistance à l'écrasement des agrégats*

Cette mesure est effectuée pour une même terre et pour un même traitement sur plusieurs dizaines d'agrégats dont la taille (entre 1 et 2 mm) correspond à celle des particules utilisées pour les tests de stabilité.

Étant donné la petite taille des particules, il n'est pas possible de les choisir d'après leur forme. D'autre part, la mesure s'effectuant entre deux pièces rigides, on ne peut prévoir la distribution des contraintes dans l'agrégat. Seul apparaît donc un effet global.

Nous avons pu cependant vérifier la normalité de la répartition des résultats obtenus autorisant le calcul d'une moyenne représentative. Cette moyenne caractérise la résistance à l'écrasement d'une terre humide imbibée par un liquide. A titre de contrôle, nous avons renouvelé les mêmes mesures dans des conditions identiques sur d'autres prises d'essai du même échantillon. Nous avons toujours obtenu des moyennes très proches traduisant une reproductibilité très satisfaisante.

Action sur la cohésion des différents liquides de traitement

Nous avons appliqué le test décrit précédemment aux terres en expérimentation après humectation par l'eau et par des solutions de saccharose et de sels à différentes concentrations.

Les mesures de résistance à l'écrasement étant malheureusement longues et délicates, nous avons dû limiter l'application de ce test à quelques solutions. Au cours des essais portant sur la première série de terres (nos 1, 2, 3) nous nous sommes bornés à des mesures de résistance à l'écrasement des agrégats après imbibition par les solutions les plus concentrées. Sur la deuxième série d'échantillons (terres nos 6, 7, 8), nous avons utilisé également des solutions diluées.

Ces mesures sont rassemblées dans le tableau 7.

TABLEAU 7

Résistance moyenne à l'écrasement des agrégats humectés
(pour un agrégat et en grammes)

1re Série					2e Série				
Liquide de traitement		Terre no 1	Terre no 2	Terre no 3	Liquide de traitement		Terre no 6	Terre no 7	Terre no 8
soluté	mol/litre				soluté	mol/litre			
Cl_2Mg	4,6	12,6		43,8	Cl_2Mg	4,75	12,5	9,8	3,2
	4,15	10,9	10,2	39,9		2,36	9,2	7,6	3,4
	3,88	7,5	7,6	24,2		0,2	5,2	5,3	2,8
	3,36	5,75	4,9	22,3		0,02	6	7	3,7
	2,75	5,5	3,7	20,8					
Cl_2Ca	5,15	5	9,4		Cl_2Ca	5,1	13	10,9	2,4
	4,9	12,6	12,3	50		3,6	10,2	6,9	2,8
	4,55	17	12	44		1,7	6,5	7,1	3,4
	4,25		10	20,9		0,85	9	7,8	3,1
	3,95	5	4,1						
ClNa	4,95	8	6,6	26	ClNa	4,95	10,4	9,3	2,5
	3,7	4,8	4	22,5		3	8,2	6,6	2,3
	2,88	5,5	3,8	20,1		0,8	6,5	6,2	2,0
						0,02	8,7	6,3	3,4
solutions de saccharose		4,6	3,9	20,5	solutions de saccharose		9,1	7,4	4
eau		4,5	3,8	20	eau		9	7,6	4

Les mesures effectuées après imbibition dans les solutions de saccharose quelle que soit leur concentration, sont toutes égales ou très voisines de celles effectuées pour la même terre dans l'eau pure. Ce fait rejoint la remarque faite précédemment et concernant l'identité des conditions d'hydratation de la terre traitée par l'eau ou les solutions sucrées. Dans le tableau, nous nous sommes bornés à indiquer pour chaque terre la moyenne des mesures effectuées en imbibant les agrégats par les diverses solutions sucrées.

Par contre, en prenant la mesure effectuée après imbibition à l'eau pure comme base de comparaison, on voit que la résistance à l'écrasement subit d'importantes variations si l'on utilise les solutions salines. L'importance et le sens de ces variations

dépendent non seulement de la nature de l'échantillon traité, mais encore de la nature et de la concentration du soluté utilisé.

Toutefois une ligne générale se dégage de l'ensemble des résultats.

Dans tous les cas, la résistance à l'écrasement croît vers les fortes concentrations. Parfois (terre nº 1, traitée par Cl_2Ca), elle atteint un maximum et subit ensuite une baisse très sensible. Les gammes plus complètes de concentration utilisées pour la deuxième série d'expériences permettent, de plus, de constater que, pour les faibles concentrations, la résistance à l'écrasement s'abaisse jusqu'à des valeurs notablement inférieures à celles obtenues après traitement à l'eau. Constatons enfin que, pour certaines terres (tel est le cas de la terre nº 8, très battante) l'utilisation de solutions de sels minéraux en remplacement de l'eau pure entraîne une baisse de la résistance à l'écrasement pour toutes les concentrations.

MONNIER (*thèse* 1965) à la suite de divers prétraitements a pu également constater des variations importantes de cohésion. Les mesures étaient cependant effectuées sur des pâtons constitués de terre pétrie et donc profondément modifiée quant à sa structure physique.

Nous verrons par la suite que ce comportement est à relier aux conditions d'hydratation de la terre. Tout se passe comme si l'absorption de certains ions limitait ou au contraire augmentait les possibilités d'hydratation des sols.

Il reste maintenant à vérifier si l'introduction de ce nouveau facteur permet une interprétation complète des phénomènes constatés.

CHAPITRE V

VÉRIFICATION DE LA THÉORIE

Le système de référence

Nous avons pu voir dans le chapitre précédent que le remplacement de l'eau pure par des solutions de saccharose comme liquide de traitement n'entraîne aucune modification de cohésion de la terre humide.

D'autre part, nous avons pu constater (chap. II, fig. 5) des variations de stabilité liées aux concentrations en sucre des liquides de traitement.

S'il est alors exact, conformément à notre hypothèse, que les conditions d'éclatement sont données par la différence entre la cohésion de la terre humide et la pression interne maximale de l'air inclus, les courbes de la figure 9 établies à cohésion constante représentent pour les différentes terres, les variations de stabilité entraînées par les modifications de la seule pression interne.

Celle-ci est elle-même sous la dépendance de conditions de captage de l'air, c'est-à-dire comme nous l'avons vu, du temps nécessaire à l'imbibition.

Nous disposons donc là d'un véritable système de référence. En effet, pour chaque terre, il est possible de déduire de la mesure du temps nécessaire à l'humectation par le liquide de traitement, le pourcentage d'agrégats stables que devrait présenter l'échantillon si la cohésion restait invariable par rapport à l'imbibition par l'eau pure.

En réalité une telle comparaison entre les traitements par les solutions sucrées et d'autres liquides ne peut être qu'approximative puisque dans les deux cas les conditions d'hydratation risquent d'être très différentes. Cependant, dans le jeu de comparaisons qui nous intéresse, cette approximation paraît suffisante. En effet, si l'on s'adresse au même matériau le volume d'air intéressé par la compression reste le même ainsi que la manière dont il est comprimé (possibilités d'échappement).

Dès lors, pour chaque terre et pour chaque solution, connaissant le temps nécessaire à l'imbibition, nous pouvons obtenir un taux d'agrégats stables théorique correspondant à une cohésion égale à celle de l'eau en recherchant sur les courbes de la figure les ordonnées du point correspondant au temps nécessaire à l'imbibition porté en abscisse.

Le taux d'agrégats stables réellement mesuré est généralement différent de cette valeur.

Selon notre hypothèse, cette différence ne peut être imputée qu'à une modification de la cohésion.

Vérification de l'hypothèse

Afin de vérifier cette proposition, nous avons confronté dans le tableau 8 :

— le taux d'agrégats stables effectivement mesuré par analyse d'agrégats dans les différentes solutions salines (s_{sol} — colonne 6) avec la stabilité théorique à cohésion constante déduite des courbes établies grâce aux traitements dans les solutions de saccharose pour une même valeur du temps nécessaire à l'imbibition d'un agrégat (s_{th} — colonne 5) ;

— la résistance à l'écrasement mesurée après imbibition par les solutions salines (c_{sol} — colonne 7) avec la résistance à l'écrasement mesurée après imbibition par l'eau ou par les solutions sucrées (c_e — colonne 2).

On voit que lorsque le pourcentage d'agrégats stables mesuré est supérieur au pourcentage théorique, la résistance à l'écrasement mesurée après imbibition par la solution de traitement est elle-même supérieure à la cohésion obtenue après humectation par l'eau.

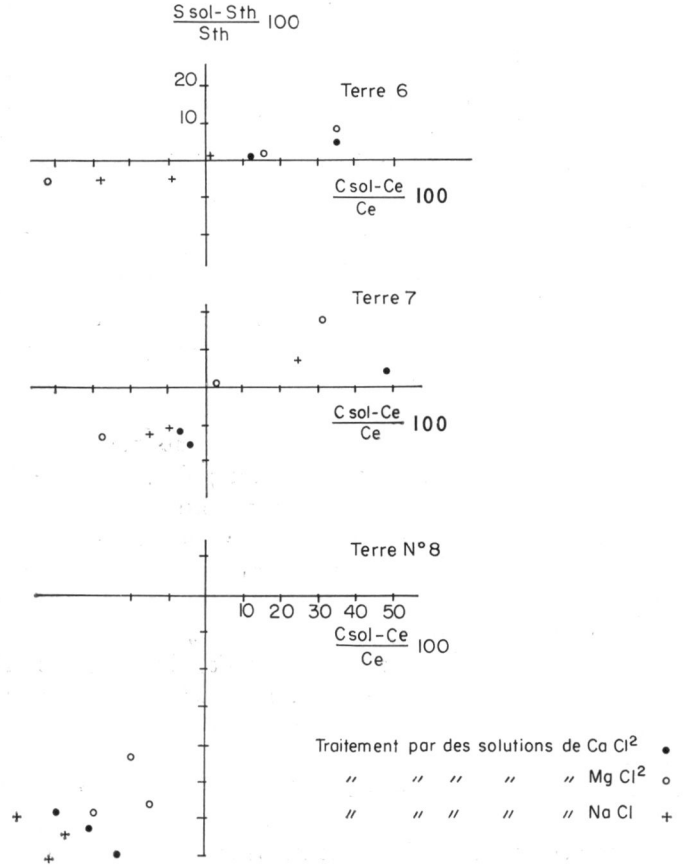


FIG. 12. — *Variations relatives du taux d'agrégats stables et de la résistance à l'écrasement*

Inversement une résistance à l'écrasement mesurée inférieure à la résistance à l'écrasement à l'eau, entraîne un pourcentage d'agrégats stables mesuré supérieur au pourcentage théorique.

Nous avons calculé les rapports $\frac{S_{sol} - S_{th}}{S_{th}}$ et $\frac{C_{sol} - C_e}{C_e}$ et porté leurs valeurs pour les différents traitements, dans les colonnes 8 et 9 du tableau 8.

Cette forme d'expression montre très nettement que les variations relatives du taux d'agrégats stables et de la résistance à l'écrasement ont dans chaque cas le même signe.

Nous avons représenté graphiquement ces résultats pour les terres 6, 7 et 8, figure 12 et, pour cette série d'expériences, il semble qu'il existe une certaine corrélation entre ces deux rapports. Cependant, si l'on tient compte des techniques employées, basées uniquement sur des tests, et de la difficulté évoquée précédemment de relier la résistance à l'écrasement à la cohésion réelle des agrégats, il nous paraît nécessaire de ne donner ici qu'une appréciation qualitative du phénomène.

En restant dans cette optique, cet ensemble d'expériences fait apparaître le rôle de la cohésion de la terre humide et tend à confirmer ainsi notre hypothèse selon laquelle les conditions de stabilité sont données par la différence entre la cohésion de la terre humide et la pression interne maximale susceptible d'être atteinte par l'air inclu.

Il reste évidemment à vérifier le caractère général de cette formule en l'appliquant à d'autres échantillons. Il faut aussi déterminer l'importance et la nature des facteurs entrant en jeu dans les variations de C et de P_i.

Cet ensemble fait l'objet de la troisième partie de cette étude.

TABLEAU 8

Influence des variations de cohésion sur la stabilité structurale

(1) N° terre	(2) c_e (en g)	(3) Nature du soluté	(4) Temps nécessaire à l'imbibition (en secondes)	(5) s_{th} %	(6) s_{sol} %	(7) c_{sol} (en g)	(8) $\frac{s_{sol} - s_{th}}{s_{th}}$	(9) $\frac{c_{sol} - c_e}{c_e}$
1	4,6	Cl_2Ca	16	28	29	5	+ 0,04	+ 0,08
			7	14,5	24,3	17	+ 0,67	+ 2,70
			6	12,5	21,4	6,6	+ 0,72	+ 0,44
		Cl_2Mg	12	22	28,5	10,9	+ 0,30	+ 1,37
			10	19	23,5	7,5	+ 0,24	+ 0,63
			7,5	17,5	18	5,8	+ 0,03	+ 0,26
2	4	Cl_2Mg	30	23,8	52,7	10,2	+ 1,21	+ 1,22
			28	22,6	41	7,6	+ 0,81	+ 0,65
			25	21,5	22,6	4,9	+ 0,05	+ 0,06
6	9	Cl_2Ca	85	80	84,2	12,5	+ 0,05	+ 0,35
			62	78	78	10,2	0	+ 0,13
		ClNa	37	76	77,8	10,4	+ 0,01	+ 0,15
			22	74,5	71	8,2	— 0,04	— 0,09
			19	73,5	70	6,5	— 0,05	— 0,28
		Cl_2Mg	115	81	88	12,5	+ 0,09	+ 0,35
			62	78	78	9,2	0	+ 0,02
			20	74	70	5,2	— 0,06	— 0,42

TABLEAU 8 (suite)

(1) N° terre	(2) c_e (en g)	(3) Nature du soluté	(4) Temps nécessaire à l'imbibition (en secondes)	(5) s_{th} %	(6) s_{sol} %	(7) c_{sol} (en g)	(8) $\frac{s_{sol} - s_{th}}{s_{th}}$	(9) $\frac{c_{sol} - c_e}{c_e}$
7	7,4	Cl_2Ca	130	63	66	10,9	+ 0,05	+ 0,48
			95	61	54	6,9	— 0,12	— 0,07
			23	52,5	44,5	7,1	— 0,15	— 0,04
		ClNa	32	54,5	58,5	9,3	+ 0,08	+ 0,26
			27	53	47,5	6,6	— 0,10	— 0,11
			23	52,5	46	6,2	— 0,13	— 0,16
		Cl_2Mg	160	63,5	75,5	9,8	+ 0,19	+ 0,32
			54	56,7	56,7	7,6	0	+ 0,02
			24	52,5	45,6	5,3	— 0,13	— 0,28
8	4	Cl_2Ca	90	49,2	20	2,4	— 0,58	— 0,40
			56	44,5	17,7	2,8	— 0,61	— 0,30
			17	35,4	11,4	3,1	— 0,68	— 0,23
		ClNa	20	36,4	13,5	2,5	— 0,63	— 0,37
			14	33,8	10,6	2,3	— 0,70	— 0,42
			11,5	32,8	13,5	2	— 0,59	— 0,50
		Cl_2Mg	119	51,1	29,2	3,2	— 0,43	— 0,20
			40	41,5	18,6	3,4	— 0,55	— 0,15
			11	32,3	13,8	2,8	— 0,57	— 0,30

TROISIÈME PARTIE

DISCUSSION

CHAPITRE I

IMPORTANCE RELATIVE DE DEUX PARAMÈTRES PRINCIPAUX

L'analyse expérimentale qui précède nous a permis de confronter le comportement de modèles constitués de petites particules de terres appartenant à plusieurs échantillons et les mécanismes théoriques intervenant dans le phénomène d'éclatement des agrégats.

Lorsque la cohésion est invariable (cas des traitements par l'eau et les solutions de saccharose) nous avons pu attribuer les modifications du taux d'agrégats stables aux différentes valeurs de la pression interne maximale (P_i) susceptible d'être atteinte par l'air inclus, selon les caractères de la solution de traitement.

Nous avons pu également constater que lorsque deux liquides entraînent une même valeur de P_i sur une terre, les cohésions à l'état humide (C), souvent très différentes, sont responsables des variations du taux d'agrégats stables.

Ainsi, ont pu être dégagés les deux facteurs principaux du phénomène, C et P_i.

Il apparaît cependant que selon la nature de l'échantillon, l'importance respective de l'un et l'autre de ces deux facteurs n'est pas la même. En effet l'amplitude des variations du taux d'agrégats stables n'est pas systématiquement proportionnelle aux modifications de P_i ou de C.

Il est vrai que nous ne possédons aucune indication sur les valeurs réelles de C et de P_i car, dans tous les cas, nous n'avons appliqué que des tests. Ceux-ci ne peuvent rendre compte que du sens des variations des facteurs en cause en comparant les mesures effectuées pour les divers traitements.

Afin de préciser les raisons du comportement des différents sols, nous avons répété nos expériences sur les terres de la troisième série d'échantillons (terres 5, 9, 11, 12, 13) dont les caractères principaux figurent tableau 4.

Nous avons effectué sur ces terres les tests de stabilité, de résistance à l'écrasement et de temps nécessaire à l'imbibition dans les divers liquides déjà utilisés. Les résultats de ces mesures sont groupés tableau 9.

TABLEAU 9

Application des tests aux échantillons de la troisième série de terres

Terre n°	Liquide de traitement	Temps nécessaire à l'imbibition d'un agrégat (en secondes)	% Agrégats stables théorique à cohésion constante s_{th}	% Agrégats stables s_{sol}	Résistance à l'écrasement d'un agrégat (en *g*) c_{sol}	$\frac{s_{sol} - s_{th}}{s_{th}}$	$\frac{c_{sol} - c_e}{c_e}$
5	Eau	38	78,6	78,6	8,3		
	Solutions de saccharose						
	20 % en poids	80	84,5	84,5	8,1		
	40 % en poids	280	91,0	91,0	8,1		
	Cl_2Ca 5,3 mol/litre	100	85	89	29	+ 0,047	+ 2,56
	3,3	60	81,5	82	21	+ 0,006	+ 1,50
	1	30	77	79,4	11,6	+ 0,03	+ 0,41
	0,5	35	78	77,4	9,9	— 0,008	+ 0,20
	Cl_2Mg 4,7 mol/litre	90	84	88	20	+ 0,048	+ 1,50
	3	60	81,5	85	11,9	+ 0,043	+ 0,44
	0,5	50	80	77	9,5	— 0,04	+ 0,15
	0,25	45	79,5	80	10	+ 0,005	+ 0,22
	ClNa 4,95 mol/litre	33	78	78	12,6	0	+ 0,52
	2,9	27	76,5	76	12	— 0,006	+ 0,46
	1	25	76	76,5	10,7	+ 0,006	+ 0,30
	0,35	33	78	76	9	— 0,025	+ 0,09
	0,2	36	78,5	78,5	8,8	0	+ 0,07
9	Eau	10,8	30,8	30,8	6,6		
	Solutions de saccharose						
	20 % en poids	24	36,4	36,4	6,5		
	40 % en poids	80	47,2	47,2	—		
	Cl_2Ca 5,3 mol/litre	63	45	52	12,5	+ 0,155	+ 0,89
	3,3	38	40,5	30,8	5,3	— 0,240	— 0,197
	1	18	34,5	21,7	5,1	— 0,370	— 0,227
	0,5	17	34	26,6	4,5	— 0,218	— 0,318
	0,25	15	33,0	33,2	6,5	+ 0,006	— 0,015

TABLEAU 9 *(suite)*

Terre n°	Liquide de traitement	Temps nécessaire à l'imbibition d'un agrégat (en secondes)	% Agrégats stables théorique à cohésion constante s_{th}	% Agrégats stables s_{sol}	Résistance à l'écrasement d'un agrégat (en g) c_{sol}	$\frac{s_{sol} - s_{th}}{s_{th}}$	$\frac{c_{sol} - c_e}{c_e}$
9	Cl_2Mg 4,7 mol/litre	60	44,5	56,5	11	+ 0,273	+ 0,66
	3	30	38,5	35,6	5,2	— 0,335	— 0,212
	0,5	11	31	23,8	4	— 0,232	— 0,394
	0,25	19	35,5	22,5	4	— 0,370	— 0,394
	ClNa 4,95 mol/litre	20	35,2	35	6,5	— 0,005	— 0,015
	2,9	15	33	31,2	5,5	— 0,055	— 0,166
	1	10	30,5	24,6	3,5	— 0,193	— 0,47
	0,35	9	29,5	19,8	3,4	— 0,328	— 0,485
	0,20	7,8	28,5	24	4,3	— 0,158	— 0,348
11	Eau	36		31	4,7		
	Solutions de saccharose						
	20 % en poids	100		45	4,7		
	40 % en poids	450		75	—		
	Cl_2Ca 5,3 mol/litre	90	43	64	20,8	+ 0,49	+ 3,42
	3,3	62	38	44,5	12,9	+ 0,17	+ 1,75
	1	31	29,5	34	5,6	+ 0,15	+ 0,22
	Cl_2Mg 4,7 mol/litre	85	42,5	59	20	+ 0,43	+ 3,07
	3	65	38,5	45	10	+ 0,17	+ 1,13
	0,5	60	37,5	36,7	4,3	— 0,02	— 0,08
	0,25	60	37,5	35,4	3,2	— 0,06	— 0,32
	ClNa 4,95 mol/litre	27	28	58	7,3	+ 1,07	+ 0,55
	2,9	27	28	29,5	5,7	+ 0,05	+ 0,21
	1	25	27,5	36	4,9	+ 0,31	+ 0,04
	0,35	29	28,5	28,5	4,7	0	0
	0,20	36	31	28	4	— 0,10	— 0,15

TABLEAU 9 *(suite)*

Terre n°	Liquide de traitement	Temps nécessaire à l'imbibition d'un agrégat (en secondes)	% Agrégats stables théorique à cohésion constante s_{th}	% Agrégats stables s_{sol}	Résistance à l'écrasement d'un agrégat (en *g*) c_{sol}	$\frac{s_{sol} - s_{th}}{s_{th}}$	$\frac{c_{sol} - c_e}{c_e}$
12	Eau	2,8	19,7	19,7	2		
	Solutions de saccharose						
	20 % en poids	8	25,4	25,4	1,9		
	40 % en poidl	25	31,6	31,6	—		
	Cl_2Ca 5,3 mol/litre	23	31,5	41,7	7,3	+ 0,323	+ 2,65
	3,3	10,7	26,5	27,8	5,2	+ 0,049	+ 1,60
	1	3,5	20,8	22	3	+ 0,058	+ 0,50
	0,5	2,2	18,5	18,5	2,25	0	+ 0,125
	Cl_2Mg 4,7 mol/litre	16	29	40,3	5,5	+ 0,39	+ 1,75
	3	7,1	24,3	27,0	3,25	+ 0,111	+ 0,625
	0,5	3,8	21,2	19,9	1,6	— 0,061	— 0,20
	0,25	3	20	17,2	1,5	— 0,135	— 0,25
	ClNa 4,95 mol/litre	4,7	22,2	32	2,7	+ 0,44	+ 0,35
	2,9	3,7	21	23	2,4	+ 0,095	+ 0,20
	1	3,7	21	16,3	1,1	— 0,224	— 0,45
	0,35	3	20	15,3	1,7	— 0,235	— 0,15
	0,20	2,8	19,7	17,4	1,9	— 0,117	— 0,05
13	Eau	5,7		21	1,6		
	Solutions de saccharose						
	20 % en poids	15		24,8	1,6		
	40 % en poids	50		31	1,6		
	Cl_2Ca 5,3 mol/litre	25	27,2	33,8	2,5	+ 0,242	+ 0,56
	3,3	15	24,8	28,2	2,1	+ 0,137	+ 0,31
	1	6,2	21,2	19,7	1,6	— 0,07	0
	0,25	6,2	21,2	21	1,6	— 0,01	0
	Cl_2Mg 4,7 mol/litre	16	25	26,8	2,6	+ 0,072	+ 0,62
	3	15	24,8	25	1,7	+ 0,008	0
	0,5	9	22,6	19,7	0,9	— 0,128	— 0,44
	0,25	7	21,6	19	1	— 0,120	— 0,38
	ClNa 4,95 mol/litre	8	22,2	32,4	2,3	+ 0,46	+ 0,44
	2,9	6	21	21	1,5	0	— 0,06
	1	4,8	20,2	19,7	1,3	— 0,025	— 0,18
	0,35	4,2	19,6	18,3	1,3	— 0,066	— 0,18

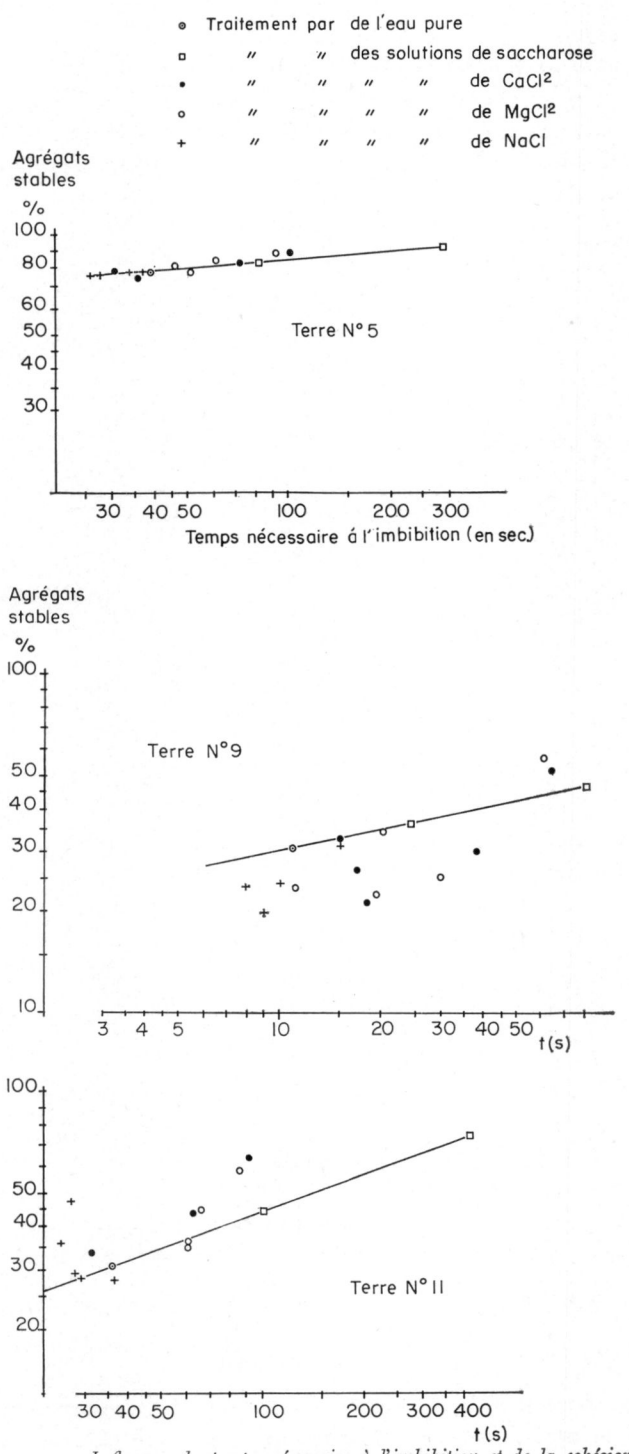


FIG. 13. — *Influence du temps nécessaire à l'imbibition et de la cohésion à l'état humide sur le taux d'agrégats stables*
(3e série d'échantillons)

Afin d'en permettre une lecture facile, nous avons :

— d'une part, représenté ces résultats sous forme graphique en traçant, pour chaque terre, la courbe de référence établie grâce aux traitements par les solutions sucrées et porté sur ce même graphique les points correspondant aux traitements par les autres liquides (fig. 13) ;

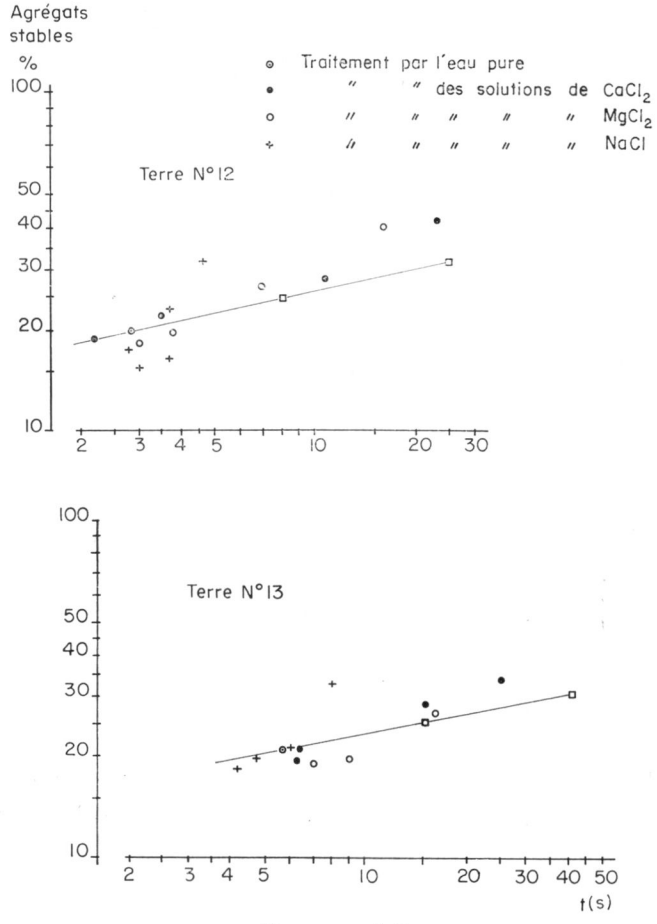


FIG. 13. — *Suite.*

— d'autre part, calculé les variations relatives de résistance à l'écrasement dans les différentes solutions par rapport aux traitements par l'eau et les solutions sucrées $\left(\frac{c_{sol} - c_e}{c_e}\right)$ et les variations relatives du taux d'agrégats stables par rapport à celui, théorique, obtenu, à cohésion constante, $\left(\frac{s_{sol} - s_{th}}{s_{th}}\right)$.

Comme précédemment nous avons adopté pour ces résultats une représentation graphique qui, si elle ne fait pas ressortir une corrélation nette entre les variations relatives de la résistance à l'écrasement et de la stabilité, permet tout au moins d'émettre quelques remarques sur les comportements des différentes terres (fig. 14).

Considérons par exemple la terre 5. Quelle que soit la cohésion, les variations de stabilité sont faibles ou nulles.

Il s'agit d'une terre naturellement très stable pour laquelle le processus d'éclatement ne peut jouer que faiblement car la cohésion de l'agrégat reste supérieure aux pressions internes obtenues par les traitements employés. Si l'on observe le comportement des agrégats de ce sol plongés dans les liquides, on remarque effectivement que l'agglomérat ne se détruit pas dans son ensemble, mais que latéralement de fines écailles se détachent. Il semble bien que le phénomène d'éclatement ne joue pratiquement qu'à ce niveau, les forces de liaison réunissant les particules élémentaires du sol étant pour ces petites écailles, inférieures aux forces de compression développées par l'air emprisonné. Pour ces raisons, ici encore, les points expérimentaux restent très proches de la courbe de référence.

L'inclinaison accentuée de la courbe de référence pour la terre 11 (fig. 13) montre les réactions marquées de cette terre aux modifications du facteur Pression interne.

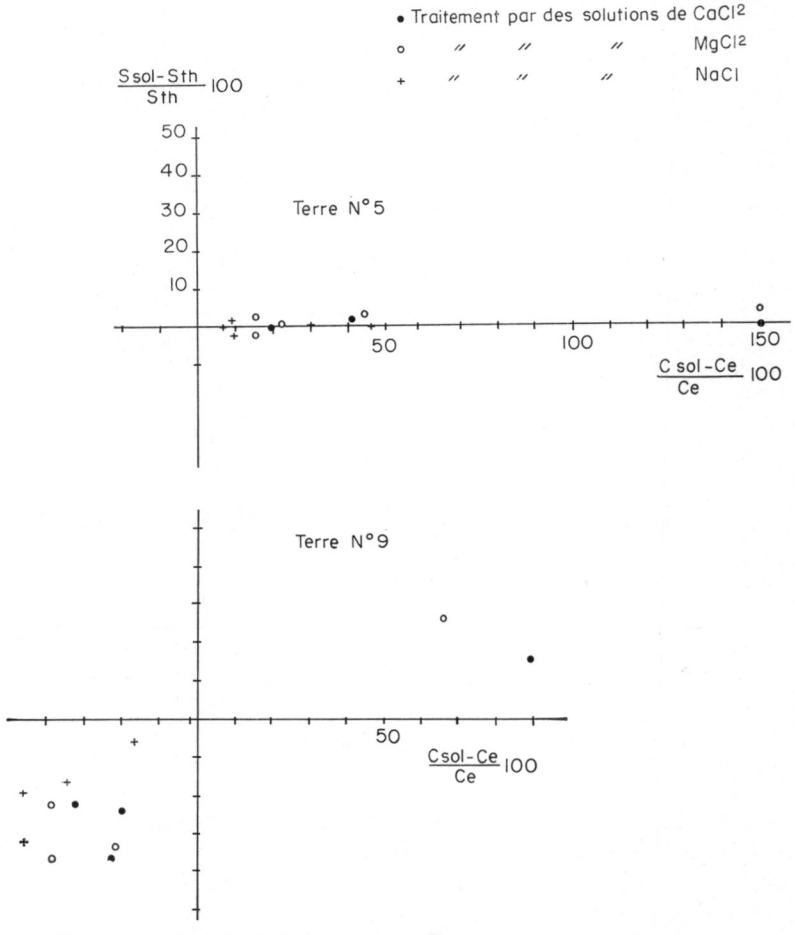


FIG. 14. — *Variations relatives du taux d'agrégats stables et de la cohésion* (3e série d'échantillons)

Elle reste également sensible aux variations de cohésion et particulièrement lorsqu'elle est traitée par des solutions de chlorure de sodium. Cette terre provient des Marais de l'Ouest où il est fréquent de constater une bonne structure en place pour

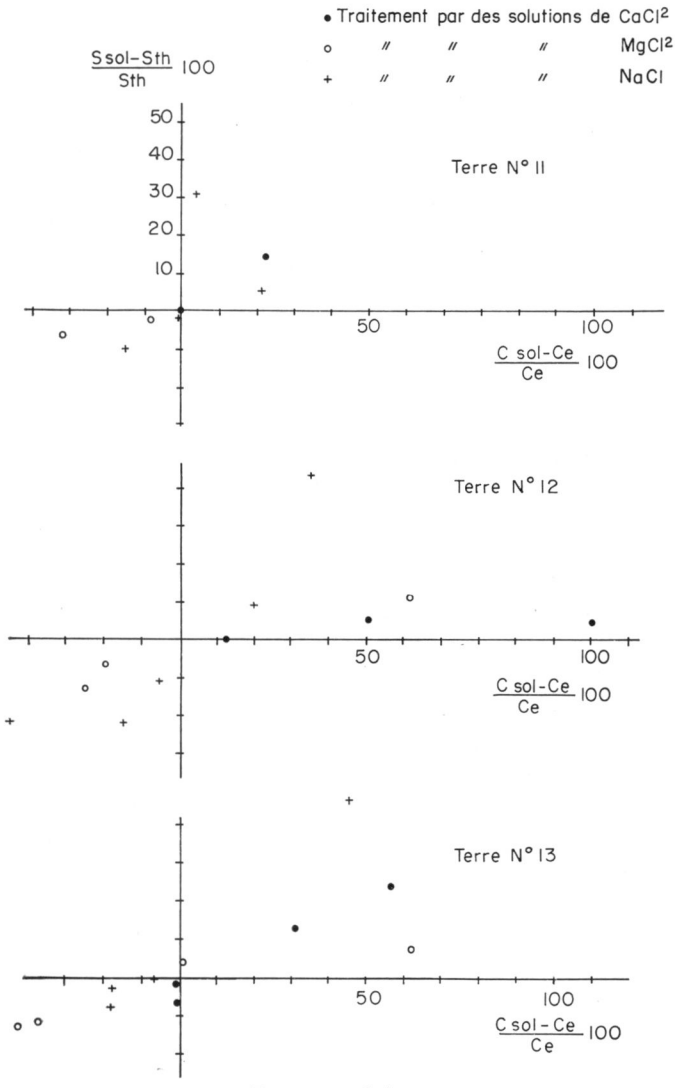


FIG. 14. — *Suite.*

les sols récemment exondés et restant chargés en sel, le dessalage entraînant souvent une dégradation. Il est probable que de tels cas mettent en jeu non seulement les variations de cohésion et de pression interne mais encore les propriétés floculantes que les sels manifestent vis-à-vis des colloïdes.

Pour la terre 9, sauf à ces concentrations très élevées, les traitements par les solutions salines entraînent une chute de cohésion qui provoque un abaissement

marqué du taux d'agrégats stables. C'est là un comportement qui paraît assez général pour les terres battantes et qui semble donc lié à la répartition granulométrique (cas de la terre 8, fig. 8).

Les terres 12 et 13 montrent une assez faible sensibilité aux variations de P_i mais, par contre, une réaction nette lorsque la cohésion varie. Il s'agit de terres sableuses à porosité grossière importante.

Cependant, il ne suffit pas de comparer l'importance relative de la cohésion ou de la pression interne. En réalité ces deux facteurs représentent les résultantes d'actions multiples qu'il importe de déceler pour obtenir une explication satisfaisante du phénomène.

Il convient donc d'analyser séparément ces deux facteurs en recherchant leurs composantes et en attribuant expérimentalement à celles-ci leur importance réelle.

CHAPITRE II

LA PRESSION INTERNE

Expression de P_i

Nous avons vu précédemment que la Pression maximale P_i susceptible d'être atteinte par l'air inclus dépend à la fois de la vitesse de pénétration du liquide de traitement dans les pores du sol et des possibilités d'échappement offertes à une partie de l'air emprisonné.
et nous avons écrit :

$$P_i = \frac{P_o\,(V_o - V_e)}{V_o - n\,\pi\,R_i^2\,z} \quad (5)\ 1^{re}\ \text{partie, chapitre II, p. 19)}$$

en appelant :

P_o, la pression atmosphérique ;
V_o, la porosité totale de l'agrégat ;
V_e, le volume d'air ayant pu s'échapper avant l'éclatement ;
R_i, le rayon moyen des plus gros pores ;
n, leur nombre ;
et z, la profondeur atteinte par les ménisques liquides à l'intérieur des capillaires.

On voit que, dans cette expression, à côté des caractères propres à l'architecture de chaque sol, figure le terme z restant sous la dépendance des interactions entre le liquide de traitement et la terre.

Nous avons pu écrire précédemment :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{2\ RT_2 \cos\alpha}{8\,\eta\,z} \quad (4)$$

soit

$$z\,dz = \frac{2\ RT_2 \cos\alpha}{8\,\eta}\,dt$$

En intégrant cette équation il vient :

$$z^2 = \frac{T_2\,R\cos\alpha}{2\,\eta}\,t + K$$

avec $K = O$ puisque Z est nul lorsque $t = O$

$$z = \sqrt{\frac{T_2\,R\cos\alpha}{2\,\eta}\,t}$$

ANTUNES DA SILVA, PEREIRA GOMÉS et LUISA DA FRANCA (1961) à partir des travaux de HALLAIRE (1953) et de SWARTZENDRUBER (1954) ont retenu l'expression $\frac{T_2 \ R \ \cos \alpha}{2 \ \eta}$ comme indice de fragilité.

Ces auteurs ont effectué les mesures de la hauteur mouillée en fonction du temps sur des colonnes de terre composées de fines particules. Ils ont montré que la représentation graphique de la fonction $z^2 = \frac{T_2 \ R \cos \alpha}{2 \ \eta} t + K$ est une droite, du moins pour les faibles valeurs de t. L'expression $\frac{T_2 \ R \cos \alpha}{2 \ \eta}$ est le coefficient angulaire de cette droite.

Cet indice permet de tenir compte des conditions de pénétration de l'eau dans le sol mais non des possibilités d'échappement de l'air inclus. Il ne met donc en évidence qu'une partie des facteurs en cause et ne peut exprimer l'ensemble des propriétés réelles du sol.

Si l'on remplace z par $\sqrt{\frac{T_2 \ R \cos \alpha}{2 \ \eta} t}$ dans l'expression de P_i, il vient :

$$P_i = \frac{V_o \ (V_o - V_e)}{V_o - n \pi \ R^2 \sqrt{\frac{T_2 \ R \cos \alpha}{2 \ \eta} t}} \qquad (6)$$

On voit que P_i est explicité par une relation comprenant un grand nombre de facteurs très difficiles à mesurer individuellement. Cette équation nous permet cependant de vérifier le sens que peuvent imprimer les variations de chacun des paramètres à la valeur de P_i. Il nous appartient d'en comparer les résultats avec ceux fournis par les faits expérimentaux.

Effet des dimensions des capillaires non obstrués et de la viscosité

Les variations de Pi en fonction du temps sont de la forme représentée par les courbes de la figure 15.

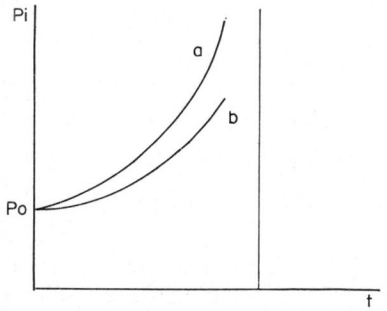


FIG. 15. — *Variations de Pi en fonction du temps*

Il est facile de constater que selon le volume d'air susceptible de s'échapper, P_i s'élève plus ou moins rapidement. Si V_e est petit, l'augmentation de P_i est très rapide (courbe *a*). Si au contraire V_e est grand, P_i n'augmente que lentement (courbe *b*). Il est évident que pour une même vitesse de pénétration du liquide et une même cohésion, les risques de rupture seront d'autant plus grands que V_e est petit. Or, V_e est sous la dépendance des rayons des capillaires non obstrués. En effet, la quantité d'air échappée sera plus grande si le rayon est plus important. Remarquons encore que, toutes choses étant égales par ailleurs et à l'instant *t*, P_i est une fonction linéaire de V_e (fig. 16).

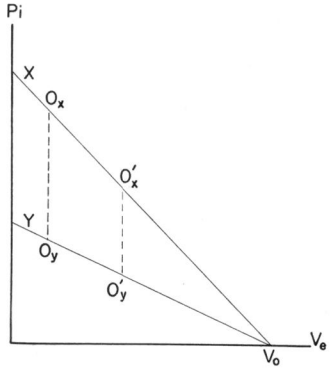


FIG. 16. — *Variations de P_i en fonction du volume d'air susceptible de s'échapper*

Supposons alors que l'on opère à deux viscosités différentes : Pour une viscosité faible, les variations de P_i en fonction de V_e sont représentées par la droite X et pour une viscosité plus élevée, par la droite Y. On voit que les écarts ($Ox = Oy$) entre les pressions internes obtenues pour les deux viscosités sont d'autant plus grands que V_e est petit. Ce résultat graphique signifie que, plus le rayon des capillaires non obstrués est petit, plus les différences de viscosité peuvent entraîner de fortes variations du facteur P_i et donc de la stabilité si l'on travaille à cohésion constante.

TABLEAU 10

Gain de stabilité obtenu dans des solutions de saccharose et volume occupé par les petits pores

Terre n°	11	3	5	6	7	1	9	12	13
Gain de stabilité p. 100	84	85	69	64	62	48	45	43	29
Vol. des pores dont la tension capill. est 1 at. % g de terre.	26,5	25,5	24	18,6	15,7	13,6	12,6	9,6	7,8

Il est possible d'en obtenir une confirmation expérimentale lorsque l'on considère les stabilités obtenues à l'aide de solutions de sucre qui, rappelons-le, ne modifient pas la cohésion.

Dans le tableau 10, nous avons en effet noté :

— D'une part, le gain de stabilité obtenu par rapport à la mesure effectuée dans l'eau en traitant par la solution de sucre la plus concentrée. Considérant que la stabilité maximale est de 100 p. 100, nous avons calculé ce gain en rapportant la différence entre les résultats des traitements au sucre et à l'eau au gain maximum susceptible d'être atteint, c'est-à-dire donné par la différence entre 100 p. 100 et le taux d'agrégats stables obtenus à l'eau.

— D'autre part, le volume occupé, dans 100 g de terre, par les pores dont la tension capillaire est supérieure à l'atmosphère lorsque l'alcool est utilisé comme liquide d'imbibition. Ce dernier résultat a été obtenu grâce à l'appareil de RICHARDS (*pressure plate extractor*).

La lecture de ce tableau permet de constater que le gain de stabilité est plus important lorsque le sol possède une grande quantité de pores fins.

Action de la mouillabilité

Dans l'expression de P_i, figure le terme $T_2 \cos \alpha$ faisant intervenir la tension superficielle du liquide de traitement et l'angle de raccordement sol/liquide. Ce terme rend compte des conditions de contact entre le sol et le liquide, c'est à dire de la mouillabilité du sol par la solution considérée.

D'après sa place dans l'équation établie précédemment et exprimant les variations de P_i en fonction du temps (6), la mouillabilité joue un rôle tel que son abaissement entraîne des effets analogues à une augmentation de viscosité.

Une telle action correspond bien aux constatations effectuées par d'autres auteurs. En effet, lorsque le sol traité est riche en matières organiques et donc difficilement mouillable, HÉNIN (*thèse 1938*) puis MONNIER (*thèse 1965*) ont constaté une nette augmentation de la stabilité.

L'évaluation directe de ce terme est malheureusement très difficile. Car s'il est possible de connaître la tension superficielle d'un liquide, nous ne disposons pas de méthodes suffisamment rigoureuses pour mesurer son angle de raccordement avec un solide aussi hétérogène que la terre.

Seules des approximations sont possibles soit par des mesures d'ascension capillaire (MONNIER) soit en utilisant les propriétés des interfaces entre deux liquides (TURC, étude non publiée). Ces procédés peuvent permettre des comparaisons entre les comportements de divers sols, et en particulier, de juger de l'influence des cations fixés sur la mouillabilité.

Nous avons cependant tenté une évaluation des conditions de contact entre le liquide et le sol en partant de l'équation établie précédemment :

$$z^2 = \frac{T_2 R \cos \alpha}{2 \eta} t \qquad (7)$$

Dans la mesure où les expériences sont effectuées sur un grand nombre d'agrégats sensiblement de la même taille, et c'est là le cas de nos essais, on peut considérer qu'à humectation complète, z^2 représente une constante. De plus, si l'on considère les traitements par des solutions sucrées, la tension superficielle reste invariable.

On a donc :

$$\cos \alpha = K \frac{\eta}{t}.$$

Nous possédons les éléments nécessaires (viscosité et temps nécessaire à l'imbibition) pour le calcul du rapport $\frac{\eta}{t}$.

Si, comme on pourrait le penser *a priori*, la mouillabilité était parfaite entre le liquide et le sol mouillé, ce rapport devrait être constant pour une même terre.

Nous avons effectué ce calcul pour plusieurs terres en utilisant les données fournies par les traitements à l'eau pure et aux solutions de saccharose à 20 et 40 p. 100 (tabl. 11).

TABLEAU II

Rapport $\frac{\eta \text{ (centispoise)}}{t \text{ (secondes)}}$

(traitement par l'eau et des solutions de saccharose)

Terre N°	6	7	8	5	9	11	12	13
Solution de traitement								
Eau	0,06	0,05	0,12	0,026	0,092	0,028	0,36	0,175
Solution de saccharose à 20 %	0,047	0,039	0,082	0,021	0,071	0,017	0,21	0,115
Solution de saccharose à 40 %	0,021	0,006	0,026	0,018	0,065	0,011	0,175	0,104

On voit que le rapport $\frac{\eta}{t}$ n'est pas constant. D'une manière générale, pour une même terre, il s'abaisse, parfois notablement, vers les plus fortes concentrations.

Ceci ne peut s'expliquer que si l'angle ne reste pas le même pendant toute la durée de l'humectation d'un agrégat. Or, on peut en effet penser que le contact entre le liquide et le sol sec s'établit imparfaitement au début de l'humectation. Le contact n'est parfait que lorsque les parois des capillaires sont déjà imbibés et l'on conçoit que plus le liquide est visqueux, plus ce contact parfait est long à s'établir. S'il en est ainsi, l'angle α varie effectivement tout au long de l'humectation. L'approximation calculée correspond donc à la valeur théorique de son cosinus (à un coefficient près) si cet angle ne subissait aucune variation pendant la totalité de l'imbibition réalisée dans le temps t (temps nécessaire à l'imbibition d'un agrégat).

On peut se demander si la mouillabilité des terres obéit aux mêmes phénomènes lorsque l'on remplace les solutions de saccharose par des solutions salines. Celles-ci sont légèrement tensio-actives et l'expression de cos α devient (d'après équation 7) :

$$\cos \alpha = K \frac{\eta}{T_2 t}$$

Nous avons effectué le calcul de $\frac{\eta}{T_2 t}$ pour les terres de la 3e série d'échantillons traités par des solutions de ClNa, Cl_2 Ca et Cl_2 Mg (tabl. 12).

Ici encore le cos α théorique varie nettement avec la concentration mais il augmente avec elle.

Tout se passe donc comme si le contact entre la solution saline et le sol était meilleur lorsque la concentration de la solution du sol augmente. Il est probable que ces phénomènes sont liés aux échanges de cations qui s'effectuent entre la terre et la solution. Ce point devra faire l'objet de travaux ultérieurs débordant le cadre de cette étude dont l'ambition se borne à dégager les mécanismes de la destruction structurale.

TABLEAU 12

Rapport $\frac{\eta}{T_2\ t}$ *3e Série d'échantillons*

(traitement par les solutions salines)

Terre n°	5	9	11	12	13
Traitement par eau	0,026	0,092	0,028	0,36	0,175
Traitement par solution de Cl_2Ca					
5,3 mol/litre	0,145	0,23	0,16	0,64	0,58
3,3 —	0,047	0,074	0,046	0,27	0,19
1,0 —	0,039	0,067	0,037	0,33	0,185
0,5 —	0,031	0,068	—	0,49	0,015 5
Traitement par solution de Cl_2Mg					
4,7 mol/litre	0,14	0,21	0,15	0,80	0,79
3,0 —	0,055	0,11	0,051	0,47	0,22
0,5 —	0,023	0,10 5	0,019	0,31	0,13
0,25 —	0,025	0,06	0,018 5	0,36	0,15
Traitement par solution de ClNa					
4,9 mol/litre	0,055	0,093	0,069	0,40	0,23
2,9 —	0,049	0,088	0,049	0,36	0,22
1,0 —	0,047	0,12	0,047	0,37	0,24
0,35 —	—	0,12	0,038	0,39	0,26

Cependant cet ensemble d'expériences montre l'importance des conditions de contact entre le liquide et le sol sur le temps nécessaire à l'imbibition et donc sur la pression interne. Il permet de concevoir les incidences de la composition de solutions en contact avec le sol dans le milieu naturel. Si la nature des cations en présence entraîne une forte mouillabilité on peut en effet s'attendre à ce que, sous l'effet d'une forte pression interne, la destruction structurale soit plus importante que celle entraînée par l'eau pure.

Notons qu'en utilisant des solutions sucrées ou même des solutions salines nous n'avons apporté que peu (cas des sels) ou pas (cas du sucre) de modifications de tension superficielle par rapport à l'eau pure. C'est pourquoi nous avons également effectué le traitement des agrégats par des mélanges alcool/eau tensio-actifs.

Pour de tels mélanges, la viscosité subit des variations en fonction des proportions d'alcool. Cet ensemble de propriétés a d'ailleurs été utilisé par HÉNIN, puis par DE LEENHEER pour apprécier la stabilité de la structure.

Ces variations de viscosité sont en réalité assez faibles, mais dans l'expression de P_i (6) figure le rapport $\frac{T_2}{\eta}$ pour lequel les effets conjugués des modifications de η et de T_2 entraînent des fluctuations importantes ainsi que l'on peut en juger tableau 13.

TABLEAU 13

Variations du rapport $\frac{T_2}{\eta}$ par rapport à l'eau pure, pour des mélanges alcool/eau

	% d'alcool				
	0	25	50	75	95
$\frac{T_2}{\eta}$	1	0,23	0,135	0,185	0,26

De telles variations devraient provoquer une diminution sensible de la Pression interne maximale susceptible d'être atteinte par l'air inclus qui se traduirait, comme nous l'avons vu précédemment, par une augmentation du temps nécessaire à l'imbibition.

En fait, les mesures de t montrent qu'il n'en est rien. t reste toujours inférieur à la valeur qu'il atteindrait dans le cas de traitement par les solutions sucrées pour un même rapport $\frac{T_2}{\eta}$ (déduit des mesures antérieures). Nous avons noté tableau 14 quelques exemples pour $\frac{T_2}{\eta} = 0{,}185$.

TABLEAU 14

Comparaison des temps nécessaires à l'imbibition par les solutions sucrées et par les mélanges alcool/eau pour une même valeur de $\frac{T_2}{\eta}$

	t pour $\frac{T_2}{\eta} = 0{,}185$	
	alcool 75 %	solutions sucrées = 5,4
N° 5	26	300
N° 11	24	500
N° 12	7	35
N° 13	9,7	55

Il faut donc admettre que cos α est nettement plus important dans le cas de traitement par les mélanges alcool/eau que dans celui de l'eau pure ou des solutions sucrées. Comme pour les essais avec les solutions salines, nous en avons calculé la valeur au coefficient près en faisant le rapport $\frac{\eta}{T_2 t}$ (voir tabl. 15).

TABLEAU 15

Calcul du rapport $\frac{\eta}{T_2 t} = \frac{cos\ \alpha}{K}$

(Traitement par l'eau pure et les mélanges alcool/eau)

	Eau pure	Mélanges alcool/eau		
		50 %	75 %	95 %
N° 5	0,026	0,15	0,21	0,13
N° 11	0,028	0,165	0,225	0,18
N° 12	0,36	1,00	0,77	0,48
N° 13	0,175	0,52	0,55	0,38

La plupart des sols sont donc beaucoup plus mouillables par les mélanges alcool/eau que par l'eau.

Pourtant le taux d'agrégats stables (Ag. p. 100) mesuré dans ces mélanges alcool/eau croît très fortement avec la proportion d'alcool (tabl. 16).

Cet accroissement de stabilité ne peut être attribué qu'aux effets de fortes augmentations de cohésion de la terre humide. Nous avons pu vérifier ce point en effectuant les mesures de résistance à l'écrasement (*c*) des agrégats imbibés par ces mélanges (tabl. 16).

TABLEAU 16

Taux d'agrégats stables. — Résistance à l'écrasement

(traitement à l'alcool)

Terre n°	Eau pure		Mélanges alcool/eau					
	Agrégats stables (%)	*c* = résistance à l'écrasement (*g*)	50 %		75 %		95 %	
			Ag. %	*c*	Ag. %	*c*	Ag. %	*c*
1	11	4,6	69	9,1	82	18	90	23
5	78,6	8,3	90,5	43	91,8	50	92,5	100
6	72	9	88,2	16	90,4	27	91,6	46
7	53	7,4	89	10	92	20	93	40
8	32	4	74	5,8	84	7,9	92	17,5
11	31	4,7	83,2	13,5	87,3	22,1	89,6	39,7
12	29	2	64	6,3	84	12	93	16,7
13	44	1,6	68	3,9	83	8	92	15,2

On voit effectivement que la résistance à l'écrasement est considérablement accrue par la présence d'alcool dans le liquide d'imbibition.

Pratiquement, en traitant les agrégats par les mélanges alcool/eau, l'augmentation de cohésion est telle que les faibles variations possibles de la Pression interne ont des effets négligeables par rapport à ceux de la cohésion.

CHAPITRE III

LA COHÉSION ET LES CONDITIONS D'HYDRATATION

Cohésion et humectation

Lorsque une terre est soumise à des humectations de plus en plus importantes, il est bien connu que sa cohésion diminue. FOUNTAINE (1956) a pu obtenir expérimentalement une courbe très régulière traduisant ce phénomène.

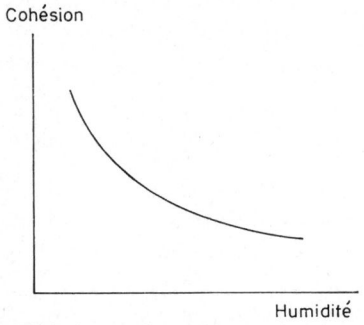


FIG. 17. — *Variations de la cohésion en fonction de l'humidité* (d'après FOUNTAINE), (1956)

Il est, de plus, facile de constater, même à l'œil nu, que cette baisse de cohésion est accompagnée d'un accroissement de volume. PANABOKKE et QUIRK (1956) puis MARSHALL (1959), en comparant le comportement de plusieurs sols, ont d'ailleurs pensé que ce gonflement, suivant son importance, pouvait être responsable des différences de stabilité constatées pour les diverses terres.

En fait, HÉNIN et HUTTER ont montré dans un travail récent (1964) la prédominance de l'éclatement dans le phénomène, les auteurs précédents n'ayant pu obtenir une corrélation entre le gonflement et la stabilité que par l'utilisation de terres sodiques comparées à des terres non sodiques.

Cependant on peut penser que, pour une même terre, cohésion et gonflement sont étroitement liés. En effet, la cohésion d'un agglomérat terreux dépend des forces unissant les particules élémentaires qui la composent et celles-ci peuvent être profondément modifiées par les conditions d'hydratation des colloïdes constituant en fait les ciments de liaison.

Ce raisonnement nous a conduit à confronter, pour chaque traitement subi, le volume de liquide susceptible d'être absorbé par le sol et la résistance à l'écrasement des agrégats humides.

Mesure du gonflement

Des mottes sont déposées à l'état sec dans une nacelle après avoir été pesées. La nacelle est alors introduite dans un récipient contenant une quantité connue de solution. L'ensemble est bouché pour éviter toute évaporation. Les mottes sont laissées au contact du liquide jusqu'à complète imbibition c'est-à-dire jusqu'à poids constant. Il suffit alors de mesurer, par pesée, le poids du liquide non utilisé pour obtenir, par différence avec le poids initial, celui du liquide retenu par la motte, et connaissant sa densité, calculer son volume, ce volume correspondant au gonflement subi par la terre.

Afin de normaliser l'expression du résultat de ces mesures, nous avons choisi de retenir la valeur g représentant le volume de liquide absorbé par unité de volume réel de sol.

Des déterminations de g n'ont pu être effectuées que sur les terres appartenant à la troisième série d'expériences, car à ce stade de nos travaux, les échantillons correspondant aux deux premières séries étaient malheureusement épuisés.

Elles ont été réalisées pour des terres et pour des traitements ayant donné lieu à des mesures de cohésion. D'une manière générale, comme KŒNIGS (1961) nous constatons une baisse du gonflement lorsque la concentration augmente.

Relations entre le gonflement et la cohésion

Afin de vérifier l'existence d'une relation entre le gonflement et la cohésion, nous avons établi un graphique portant g en ordonnée et, en abscisse, la résistance à l'écrasement c. Ainsi sur ce graphique, un point correspond, pour chaque terre, à l'application d'un traitement.

On peut alors constater, en utilisant des coordonnées logarithmiques, que les points correspondant à une même terre se disposent suivant une droite. De plus et quelle que soit la terre, la pente de cette droite reste uniforme. Les graphiques de la figure 18 montrent la série de droites parallèles que nous avons pu tracer à l'aide des points expérimentaux. Il semble que la gamme de granulométries couverte par les terres traitées soit suffisamment large et ce groupe de terres d'origines assez diverses pour autoriser une généralisation des résultats obtenus.

Ainsi une courbe monotone paraît donc bien lier la résistance à l'écrasement et le volume de liquide absorbé par la terre. Son équation est de la forme $c = \left(\frac{g_1}{g}\right)^n$, n étant très voisin de 4 et g_1 représentant le gonflement théorique pour une résistance à l'écrasement de 1 gramme.

La forme de la relation reste la même pour toutes les terres. Seul varie le coefficient g_1. On est donc conduit à penser que ce coefficient constitue une valeur caractéristique d'un sol.

Il paraît lié au taux de colloïdes. En effet, g_1, point de rencontre de la droite avec l'axe des ordonnées semble d'autant plus fort que les sols sont argileux. Cependant il ne paraît pas exister de relation précise entre g_1 et le taux d'argile. Il est très vraisemblable qu'interviennent également la nature des colloïdes et leur garniture cationique.

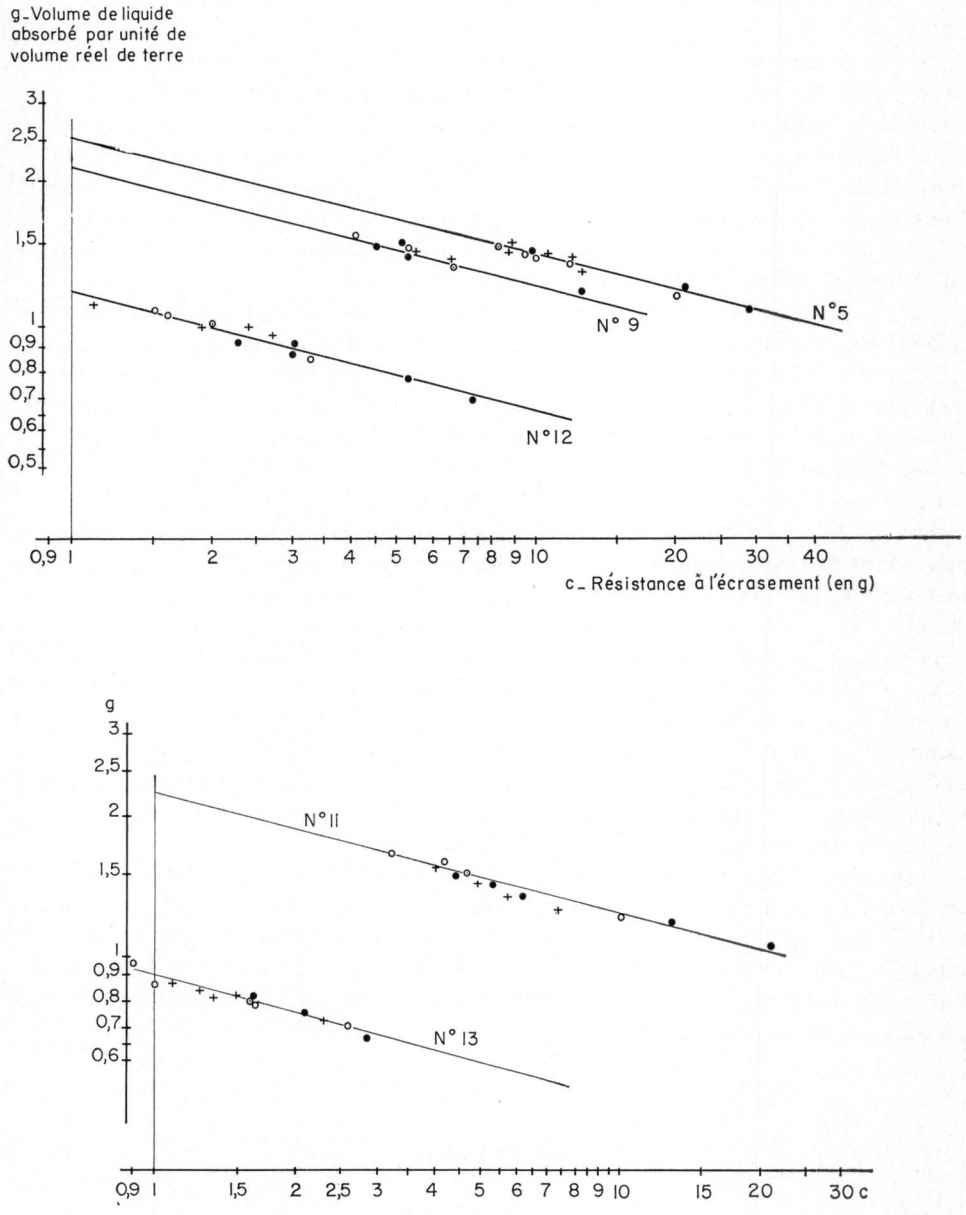


FIG. 18. — *Relations entre la résistance à l'écrasement et le volume de liquide absorbé par unité de volume réel de sol*

L'un des points de la droite correspond au traitement par l'eau pure. Si l'on effectue des comparaisons entre les positions occupées par ce point selon la nature de la terre, on peut remarquer que les sols les plus argileux sont à la fois les plus gonflants et les plus cohérents.

Cette remarque permet de comprendre pourquoi les résultats antérieurs mettant en évidence une relation entre la résistance à l'écrasement à l'état sec et la stabilité structurale constituent une première approximation de l'influence de la cohésion sur la stabilité. La stabilité structurale est en effet, comme nous avons pu le démontrer dans les chapitres précédents, en relation étroite avec la cohésion de la terre humide. Nous venons de constater d'autre part que celle-ci est plus importante lorsque le taux d'argile augmente et il est bien connu qu'un enrichissement en argile entraîne une plus grande résistance à l'écrasement à l'état sec.

Il en irait évidemment tout autrement si la cohésion de la terre était due à des ciments ne présentant pas de gonflement au contact de l'eau, comme des hydroxydes.

L'effet de la teneur en colloïdes argileux sur la stabilité a pu être également noté par HÉNIN et HUTTER (1964) au cours de travaux comparant l'importance respective, dans la destruction structurale, du phénomène d'éclatement et du gonflement différentiel pouvant intervenir au cours de l'humectation. Il convient cependant de noter que ce fait n'est bien entendu exact que dans la mesure où les fragments de terre constituent des ensembles suffisamment continus, c'est-à-dire ne présentant pas de fissures. Or dans une étude récente non publiée, KHEYRABI a pu réaliser différentes compositions granulométriques afin d'étudier leur cohésion et leur stabilité. Il a constaté l'apparition de fissurations dès que le mélange comporte un taux d'argile suffisamment élevé. Il est probable que ces faits sont dus à des phénomènes d'orientation des micelles d'argile ménageant des plans de clivage. Des cas analogues peuvent évidemment se présenter dans la nature. D'ailleurs, pour certaines terres, au cours des mesures de résistance à l'écrasement, on peut remarquer une certaine fissuration pour des efforts inférieurs à ceux nécessaires pour l'écrasement proprement dit de l'agrégat.

C'est en particulier le cas de l'Ile d'Elle (Terre II).

En résumé, les résultats exposés dans cette étude sont en parfait accord avec les travaux antérieurs. La relation que nous avons établie exprime pour une même terre, le sens des variations de cohésion lorsque les conditions d'hydratation sont modifiées par l'utilisation de solutions autres que l'eau pure et la discussion des faits expérimentaux permet de retrouver la plupart des conclusions émises par divers auteurs sur ce problème.

CONCLUSION

Si l'on part du schéma statique proposé par HÉNIN (*thèse 1938*) on peut obtenir une certaine interprétation de la résistance des sols à l'action de l'eau.

Ce schéma suppose que la fragmentation des agrégats est liée à la pression exercée par la pénétration de l'eau dans les capillaires du sol, cette pression étant susceptible de provoquer la rupture lorsqu'elle dépasse la cohésion de la particule.

Or, lorsque l'analyse d'agrégats est réalisée dans des solutions de saccharose, on obtient un effet de stabilisation qui ne peut être interprété sur la base précédente. En effet, la viscosité de la solution, c'est-à-dire un facteur dynamique, est alors mise en cause. Nous avons alors été amenés à rassembler un certain nombre d'arguments montrant que la viscosité intervient en retardant l'emprisonnement de l'air dans les pores des agrégats.

Cependant, l'action de ces solutions ne masque pas complètement l'influence d'un vide préalable, ce qui laisse supposer l'intervention d'autres facteurs.

Nous avons donc cherché à développer une théorie dynamique en tenant compte exclusivement du groupe de facteurs (viscosité et tension superficielle des solutions, angle de raccordement sol/solution) responsable de la vitesse de pénétration des liquides et de la pression interne maximale susceptible d'être produite par l'air inclus dans la terre.

Les effets des solutions utilisées ne peuvent être comparés que globalement par des tests de vitesse d'humectation. Cependant pour certains sols, on obtient un accord raisonnable entre les prévisions et l'expérience.

Mais il reste de très nombreuses exceptions qu'il était logique d'interpréter en faisant intervenir la cohésion de la terre humide et sa cause immédiate : l'importance du gonflement. Là encore, il a été nécessaire d'utiliser des tests. Ceux-ci ont pu être appliqués dans des conditions suffisamment comparables pour conduire à l'établissement de courbes très régulières reliant gonflement et cohésion.

Si l'on confronte alors l'influence des solutions sur la cohésion de la terre et les anomalies de comportement par rapport aux facteurs caractérisant la vitesse de pénétration et responsables de la pression interne maximale de l'air dans les agrégats le rôle de la cohésion apparaît nettement.

Cet ensemble de résultats aboutit donc à une interprétation cohérente quoique malheureusement seulement qualitative, du phénomène de stabilité des agrégats. Elle permet d'introduire à côté de faits dont le rôle avait été établi précédemment, l'action d'autres variables telles que la viscosité des solutions ou la vitesse d'humectation.

Enfin, on lève ainsi une contradiction apparente entre deux théories, celle expliquant la dégradation par la compression de l'air inclus dans les agrégats, théorie que nous avons confirmée, et celle rattachant cette dégradation au gonflement des agrégats. Ce n'est pas par suite du gonflement que les agrégats se détruisent, mais parce que, à cause du gonflement, la cohésion diminue.

Cet ensemble de résultats nécessite maintenant des travaux sur un plan plus fondamental et concernant les mécanismes du gonflement en présence de diverses solutions salines.

De même, si nous avons pu dégager des facteurs principaux réglant pour une terre les conditions d'établissement de la pression interne maximale, il resterait à réaliser des recherches plus poussées sur les problèmes de mouillabilité ou sur les incidences des dimensions des pores et de leur répartition sur la stabilité structurale.

Il n'en reste pas moins que les faits exposés et leurs conséquences ont une importance agronomique immédiate en mettant l'accent sur le rôle possible des sels solubles, apportés aux sols comme agents de fertilisation, sur la stabilité de la structure.

C'est une servitude de la recherche appliquée que de limiter ses objectifs à l'interprétation des mécanismes qui, pour n'être pas fondamentaux au sens habituel du terme, n'en ont pas moins des conséquences techniques, donc économiques, considérables.

SUMMARY

MECHANISMS OF THE DESTRUCTION OF SOIL AGGREGATES IN CONTACT WITH AQUEOUS SOLUTIONS

The degradation of soil structure, an important agricultural problem, has been studied by many authors.

HÉNIN demonstrated the occurrence of breaking up of aggregates under the influence of compression of air enclosed by the capillary penetration of water into pores. The mechanisms causing this effect still remained to be studied for an understanding of the basic factors.

In the first part, by recalling previous work and some theoretical remarks that have been confirmed by observation, a dynamic interpretation of the phenomena of aggregate destruction is stated and summarized in the form :

$$s = C - P_i$$

where s represents the stability conditions, C the cohesion of humid soil, and P_i the maximum internal pressure that could be attained by air trapped in soil particles.

The second part is devoted to the demonstration of this theory. Several soils covering a wide granulometric range were submitted to aggregate analysis in saline or sucrose solutions of various concentrations. The relative importance of the two parameters C and P_i were confirmed by means of variations in the physico-chemical properties of these solutions. The tests, whose use is justified by statistical analysis (resistance to crushing, rate of aggregate moistening), supported this demonstration.

Finally, in a third part, the components of the essential parameters were studied. Factors such as dimensions of the soil capillaries, viscosity of the treatment solutions, and the moistening capacity were shown to have an important effect on the maximum internal pressure obtainable by air enclosed in the aggregates. In the same way, inflation of the soil particles seems to be responsible for variations in cohesion, the two values being linked by a monotonic relationship.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE MECHANISMEN DER ZERSTÖRUNG VON BODENGEMISCHEN UNTER DER EINWIRKUNG WÄSSERIGER LÖSUNGEN

Mit dem Problem der stufenweisen Verwitterung der Bodenstruktur — dies ist ein wichtiges landwirtschaftliches Problem — haben sich viele Verfasser beschäftigt.

HÉNIN wies das Vorkommen von Gemischaufbrüchen unter der Einwirkung von Druckluft nach, die durch die kapillare Eindringung von Wasser in die Poren eingeschlossen ist. Der Mechanismus, der diese Wirkung hervorruft, muss noch näher studiert werden, wenn man die grundlegenden Faktoren besser verstehen will.

Im ersten Teil wird durch Hinweise auf frühere Arbeiten und auf einige theoretische Feststellungen, die durch Beobachtungen bestätigt wurden, eine dynamische Interpretation des Phänomen der Bodengemischzerstörung gegeben und in der folgenden Formel zusammengefasst :

$$s = C - P_i$$

wobei s die Stabilitätskriterien, C die Kohäsion des feuchten Bodens und P_i den maximalen Innendruck darstellt, der durch die in den Bodenteilen eingeschlossenen Luft ausgeübt werden könnte.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich damit, diese Theorie zu demonstrieren. Mehrere Erdstoffe verschiedener Kornabstufungen wurden analytisch in Salz- oder Sukroselösungen verschiedener Konzentration untersucht. Die relative Bedeutung der Parameter C und P_i wurde durch Veränderung der physikalisch-chemischen Eigenschaften dieser Lösungen bestätigt. Die Untersuchungen,

deren Durchführung durch statistische Analyse gerechtfertigt war, Brechwiderstand, Geschwindigkeit der Befeuchtung der Bodenmischung — bestätigten diese Demonstration.

Im dritten Teil werden dann die Komponenten der verschiedenen Parameter studiert. Es wird gezeigt, dass Faktoren wie die Dimensionen der Bodenkapillare, die Viskosität der benutzten Lösungen und die Befeuchtungsfähikeit einen bedeutenden Einfluss haben auf den maximalen Innendruck, der von der Luft ausgeht, die in den Bodenmischungen eingeschlossen ist. In gleicher Weise scheint die Aufbläsung der Bodenteilchen die Ursache der Kohäsionsveränderungen zu sein, da die beiden Werte durch eine gleichförmige Beziehung miteinander verbunden sind.

РЕЗЮМЭ

Изучение механизмов распада агрегатов при их контакте с водными растворами.

КОНКАРЭ.

Разрушение почвенной структуры — важная проблема сельского хозяйства — интересовало многих авторов.

Хенэн показал очевидность процесса разрыва почвенных агрегатов под влиянием сжатия заключенного в них воздуха, вызванного капилярным проникновением воды в поры. Оставалось, однако, изучить механизмы этого разрушения, чтобы выделить главнейшие его факторы.

В первой части данного труд перечень работ по этому вопросу и несколько теоритических заметок подтвержденных наблюдениями, помогают автору об'яснить динамику феноменов разрушения агрегатов, которая может выражаться в следующей форме : $s = C - P_i$, где

s = условия стабильности;

C — сила сцепления увлажненной почвы;

P_i = максимальное внутреннее давление, которого может достичь воздух введенный в почвенные частички.

Вторая часть посвящена проверке этой теории. Проделывался анализ различных почв с широким гранулометрическим диапазоном в растворах солей или сахарозы разной концентрации. Изменения физико-химических свойств жидкостей полученных таким образом, подтвердили относительную важность параметров C и P_i. опыты, применение которых допускается при статистическом анализе (сопротивление раздавливанию, скорость увлажнения агрегата) подкрепляют это доказательство.

И, наконец, в третьей части изучаются составные гавных параметров. Подчеркивается влияние таких факторов как размеры капилляров почвы, вязкость жидкостей служащих для обработки и увлажнение, на максимальное внутреннее давление которому может быть подвержен воздух заключенный в агрегатах. Набухание почвенных частиц также в некоторой мере ответсвенно за изменения силы сцепления, ибо обе эти величины связаны однообразной кривой.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANTUNES DA SILVA, PEREIRA GOMÈS, LUISA DA FRANCA, 1961. *Déterminaçoes fisicas nos solos — Missao de estudes agronomicos do ultramar.* Communicaçoes, nº 11, Meau, Lisboa, Portugal.

BARY P., 1931. L'électro-chimie des colloïdes, ses applications industrielles. *Bull. Soc. Encour.*, **130**, 517-546.

BLANCHET R., 1965. Quelques aspects récents des études relatives à l'alimentation minérale des plantes dans le sol. *Sci. Sol*, **2**, 109.

BOODT N de., LEENHEER L de., 1958. Proposition pour l'évaluation de la stabilité des agrégats sur le terrain. *Proc. internation. Symp. Soil Structure*, Gand, 234-241.

BOUASSE H., 1924. *Capillarité. Phénomènes superficiels.* Paris, Delagrave 437 p.

CONCARET J., 1964. Étude des mécanismes déterminant la stabilité structurale des sols. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **259**, 4 317-4 319.

ELLISON W. D., 1954. Mechanics of water érosion. *C. R. Ve Congr. internation. Sci. Sol*, Léopoldville, 380-387.

FEODOROFF A., 1958. Un appareil pour le tamisage de la terre sous l'eau. *Ann. agron.*, 537-548.

FEODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol (Indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, **6**, 651-659.

FOUNTAINE, 1956. *The effect of moisture content on the mechanical properties of Soils.* Brit. Soc. Soil Sci., Londres.

HALLAIRE M., 1953. *Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur. Sous-sols nus et cultivés.* Thèse, Paris.

Handbook of chemistry and physics. Cleveland (Ohio), Chemical Rubber CO., 45e éd., 1964-1965.

HÉNIN S., 1938. *Étude physico-chimique de la stabilité structurale des terres.* Thèse, Paris.

HÉNIN S., 1948. Essai d'une théorie de la stabilité de la structure des sols. *Plant and Soil*, **1**, 167-178.

HÉNIN S., ROBICHET O., JONGERIUS A., 1955. Principes pour l'évaluation de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, 537-557.

HÉNIN S., MONNIER G., 1956. Évaluation de la stabilité de la structure du sol. *C. R. VIe Congr. internation. Sci. Sol*, Paris, Vol. B, 49-52.

HÉNIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, 73-92.

HÉNIN S., HUTTER W., 1964. Essai sur le gonflement comme mécanisme de la stabilité structurale des sols. *Sci. Sol*, n° 2.

HÉNIN S., CONCARET J., 1965. Sur une propriété déterminant la stabilité structurale des terres : la cohésion à l'état humide. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **261**, 2734-2737.

HUTTER W., 1966. Action des compressions sur la structure d'un sol. *Ann. agron.*, 37-52.

KHEYRABI 1965. Thèse (en préparation).

KŒNIGS, 1961. *The mechanical stability of clay soils as influenced by the moisture conditions and some other factors.* Thèse, Wageningen.

MARSHALL T. J., 1959. *Relation between water and soil.* Commonw. Bur. Soils Tech. Commun., N° 50.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse, Paris.

PANABOKKE C. R., OUIRK J. P., 1956. Effect of initial water content on stability of soil agregats in water. *Soil Sci.*, **83**, 185-195.

RICHARDS. *Pressure plate extractor.*

SCHLŒSING Th., 1885. *Chimie agricole.* Encyclopédie Frémy-Dunod, Paris, Dunod, **10**, 64.

SWARTZENDRUBER D., DE BOODT M., KIRKHAM D., 1954. Capillary intake rate of water and soil structure. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, **18**, 1-7.

SWARTZENDRUBER D., 1956. Anomalies in capillary intake explained. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, **20**, 453-458.

TURC. Étude non publiée.

YODER A., 1936. Direct method of agregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. *J. amer. Soc. Agron.*, **28**, 337-351.

VESSEREAU A., 1948. *Recherche et expérimentation en agriculture*, **11**, 4.

Ann. agron., 1967, **18** (2), 145-201.

L'ALTÉRATION DES GRANITES A 2 MICAS DU MASSIF DE LA PIERRE-QUI-VIRE

DEUXIÈME PARTIE [1]

J. DEJOU
avec la collaboration technique
de Colette CHAUMONT, Monique JACQUIN [1], P. AUBRY [1]

Station d'Agronomie, 36 - Châteauroux
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est [2]

SOMMAIRE

Les granites à 2 micas de la Pierre-qui-Vire s'altèrent de façon identique, quel que soit leur faciès, lorsqu'ils sont placés dans une situation morphologique semblable. Leur décomposition est caractérisée par une intense désagrégation physique, donnant naissance à des arènes de grande épaisseur, et une altération chimique très ménagée.

INTRODUCTION

Dans un premier mémoire, nous avons étudié les caractéristiques pétrographiques et pétrochimiques des granites à 2 micas du massif de la Pierre-qui-Vire, et montré la répartition des trois faciès fondamentaux ordonnée en zones concentriques régulières : le faciès à gros grain dominant occupe le cœur du massif ; un faciès à grain intermédiaire lui fait suite, tandis qu'à la périphérie se localise le faciès à grain fin. Au cours de cette seconde étude, nous examinerons plus spécialement les modalités de l'altération de ces granites, à la fois sous l'angle physique, minéralogique et chimique, modalités qui se présentent ici de façon bien particulière conférant au massif une personnalité accusée. En même temps, nous pourrons établir des comparaisons, toujours dans le domaine de l'altération, avec quelques formations granitiques voisines ou appartenant à des massifs plus lointains.

(1) Le premier mémoire a paru dans les Annales agronomiques (1966) v. 17, n° 2, p. 99-1417.
(2) Station d'Agronomie, 21 - Dijon.

L'ALTÉRATION PHYSIQUE DES GRANITES DE LA PIERRE-QUI-VIRE

I. — CARACTÈRES GÉNÉRAUX DE CETTE ALTÉRATION

1° *Généralisation des phénomènes d'altération sur les 3 faciès du granite*

L'une des caractéristiques fondamentales de ces granites est la quasi-généralisation de leur intense altération physique acquise sur place, dans l'ensemble du massif (J. DEJOU, J. LAMEYRE, 1965). Cette altération affecte, en effet, d'une façon sensiblement identique les 3 faciès, hormis quelques exceptions dans le type fin, quand ils se situent en position morphologique comparable ; ce fait mérite d'être souligné, puisqu'il va à l'encontre des données classiques (M. DERRUAU, 1962) où l'on a coutume de considérer et de constater effectivement qu'une roche à grain fin se montre plus résistante qu'une roche à gros grain.

La région offrant de très nombreuses coupes naturelles, il est aisé de glaner les observations suivantes :

a) *Granite à gros grain.*

Son altération est générale en position de plateau, et elle a donné naissance à une arène se développant sur une grande épaisseur, souvent plusieurs mètres, surmontée d'un sol de profondeur variable, tout à fait comparable à celle qui affecte le granite porphyroïde de Lormes voisin (J. DEJOU, 1958). D'ailleurs, il n'est pas possible de préciser avec exactitude l'ampleur de cette désagrégation physique, car nulle part, on n'aperçoit de coupes idéales où seraient rassemblés sur un même profil la roche fraîche, la zone d'altération et le sol.

Parmi les nombreux gisements, dont la position géographique est précisée dans la figure 1 et les annexes I et II, à la fin de ce mémoire, on peut citer les coupes suivantes qui apparaissent parfaitement représentatives des processus d'arénisation :

Nord-ouest du massif. — Coupes dans le domaine du monastère de la Pierre-qui-Vire, n° 11 et 22, en face de la Chapelle (fig. 3), où l'arénisation atteint environ 6 m et où l'on peut observer de façon très nette, le passage de la zone altérée à l'arène proprement dite. La comparaison avec l'arénisation du granite porphyroïde à Biotite est très aisée dans la forêt de Saint-Léger, située tout à proximité, 1 km environ (fig. 2), en position de plateau, comme à la Pierre-qui-Vire et où l'on note la même disposition du profil, la même intensité d'altération, avec toutefois une arène plus grossière que celle des granites à 2 micas.

Sud-ouest du massif. — Coupe du-Bois-des Montées, n° 90 bis (fig. 4) sur la route D 20, située dans une région remarquablement plate, favorable par conséquent aux études des processus d'altération.

Ouest, nord-est et Centre du massif. — On rencontre également de très beaux exemples d'arénisation, tels ceux de Poil-Chevré (n° 16) et des Brizards (n° 18).

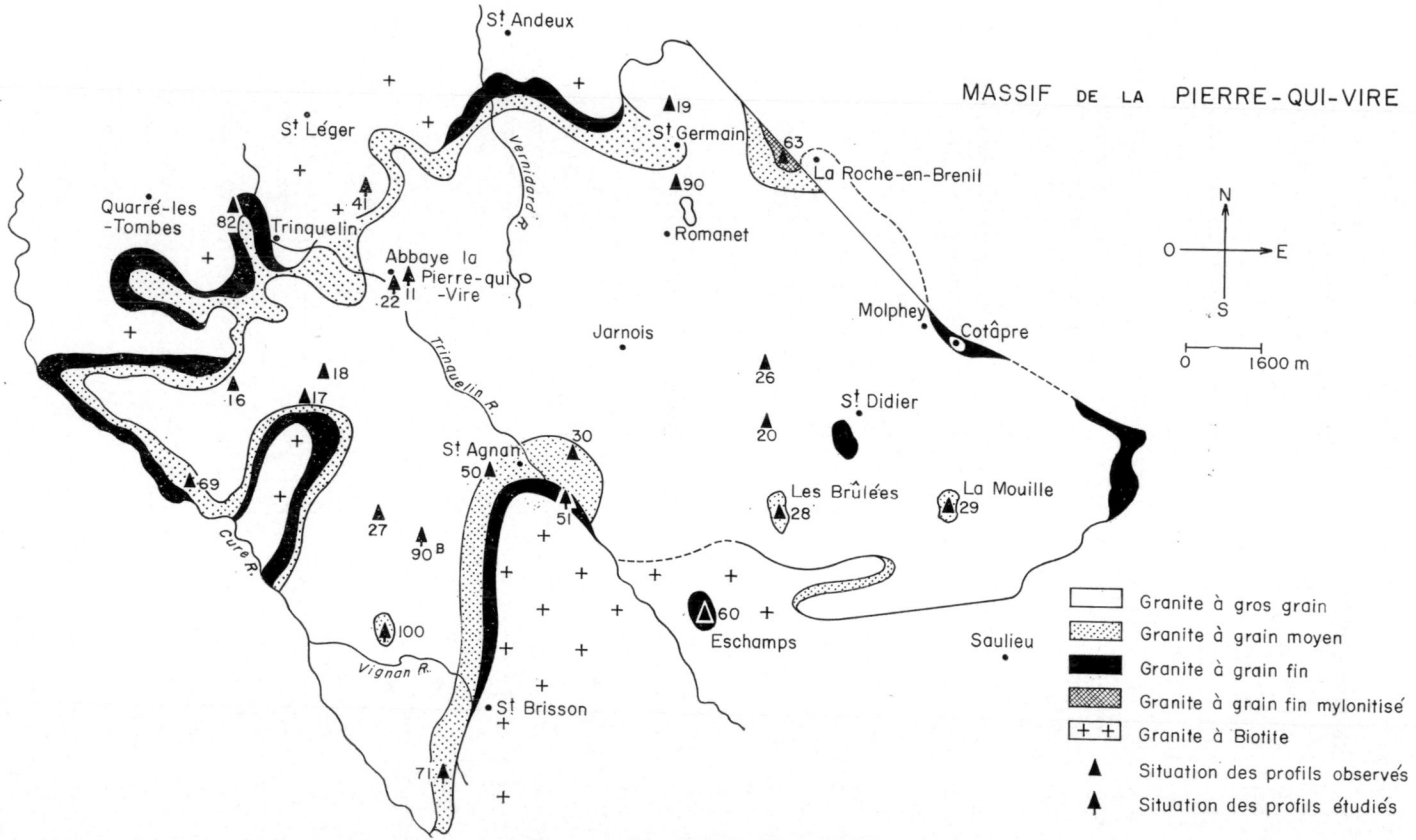


FIG. 1. — *Massif de la Pierre-qui-Vire*
Situation des profils observés

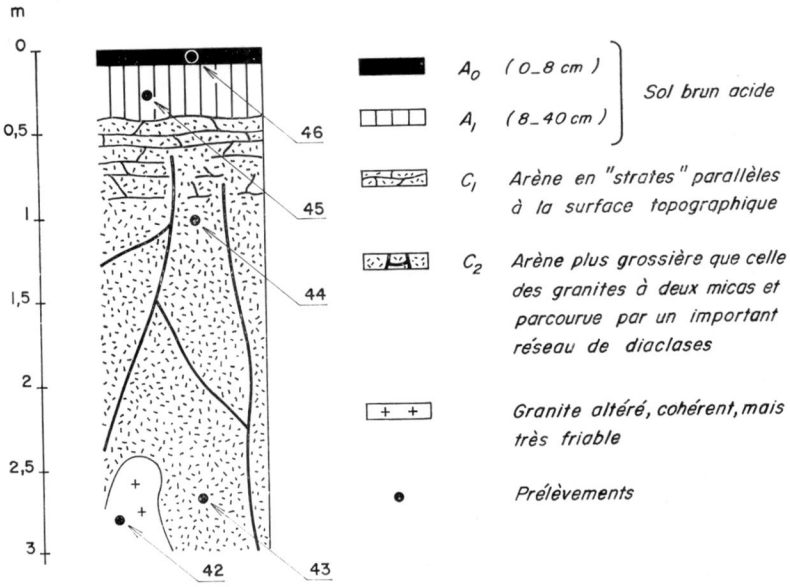


FIG. 2. — *Coupe de la Forêt de Saint-Léger, près de la Pierre-qui-Vire*
Granite porphyroïde à biotite. Zone plate

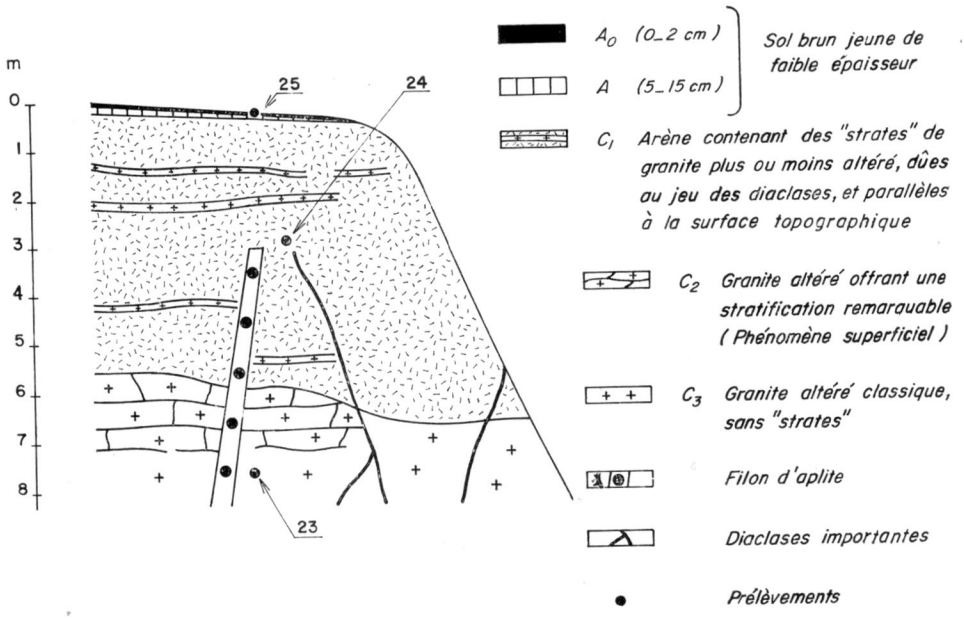


FIG. 3. — *Coupe en face de la Chapelle du Monastère de la Pierre-qui-Vire*
Granite à gros grain

b) *Granite à grain de taille intermédiaire.*

Tout comme le granite à gros grain, celui où la taille des cristaux est intermédiaire est susceptible de s'altérer selon une intensité voisine du précédent, à condition de se trouver en position de plateau où les processus d'altération s'exercent toujours avec le maximum de vigueur. Il est également facile de repérer des profils typiques dans les diverses zones du massif.

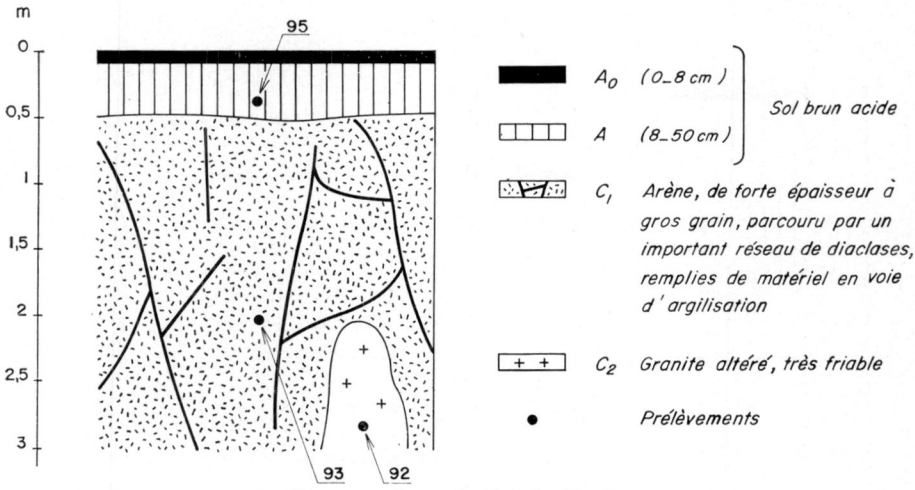


FIG. 4. — *Coupe du Bois-des-Montées*
Granite à gros grain

Ouest du massif. — Coupes dans le Bois de la Pérouse et le Gué de Dun, à l'Est de la Cure. L'arénisation d'un granite du type « Roche-des-Fées » (n° 69) s'avère importante et sur la route forestière de Dun, on note plusieurs coupes où la zone d'altération atteint 2 à 3 m.

Dans le sud du massif. — Il faut citer l'altération puissante qui affecte le versant du Bois-Rapé où l'on repère le long de la route Montsauche-Saulieu de fort beaux profils ; celui de Saint-Brisson, n° 71 (schéma 5), près de la cote 643, a été retenu comme type.

Enfin, à l'est, on observe aussi une intense arénisation dans des enclaves de granite à grain moyen, au sein du granite fondamental, localisées au sud de Saint-Didier, notamment aux Brûlées (n° 28) et à la Mouille (n° 29) sur la route N 6 Saulieu-Paris ; ce dernier gisement comporte plusieurs mètres d'une arène très riche en Muscovite.

c) *Granite à grain fin.*

Eu égard à la superficie très faible qu'occupe ce faciès, comparativement aux deux précédents, les observations sont moins nombreuses et de plus l'arénisation, même en position de plateau, n'offre pas partout cette homogénéité et cette similitude de visage que nous avons notées jusqu'ici. Peut-être des différences de structure et de cohésion entre les cristaux interviennent-elles ici pour créer des différenciations

dans la résistance des roches à grain fin, dont le comportement est plus hétérogène Cependant, des exemples d'altération profonde, parfaitement représentative, peuvent être cités dans le Bois de la Chevrée tout à côté de Saint-Agnan (nº 51), sur la route conduisant à la Pierre-qui-Vire ; le schéma 6 représente cette coupe complexe sur laquelle nous reviendrons ultérieurement. Il faut également signaler le profil du village de Moulin-Colas (nº 82), au nord de Trinquelin, où un faciès à grain fin contenant des quartz globulaires et des enclaves riches en Cordiérite, s'altère avec une intensité un peu plus restreinte cependant que le granite de Saint-Agnan.

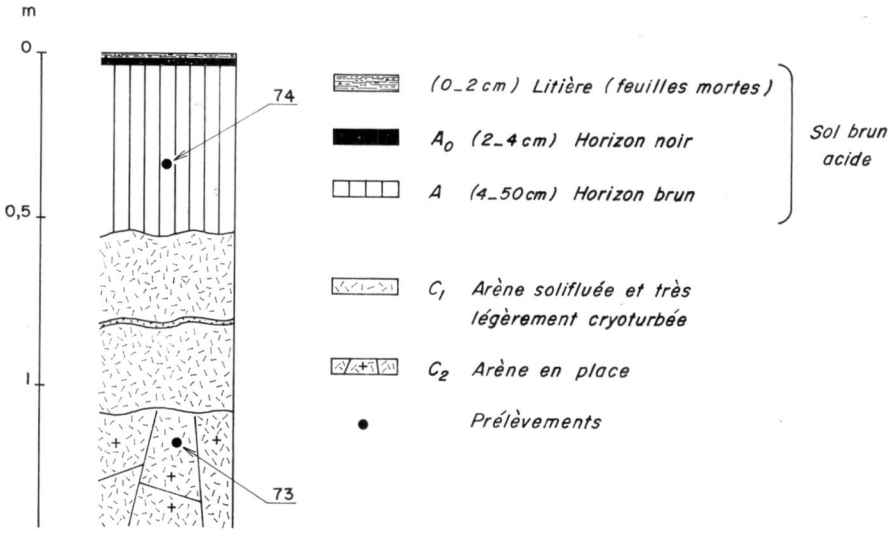


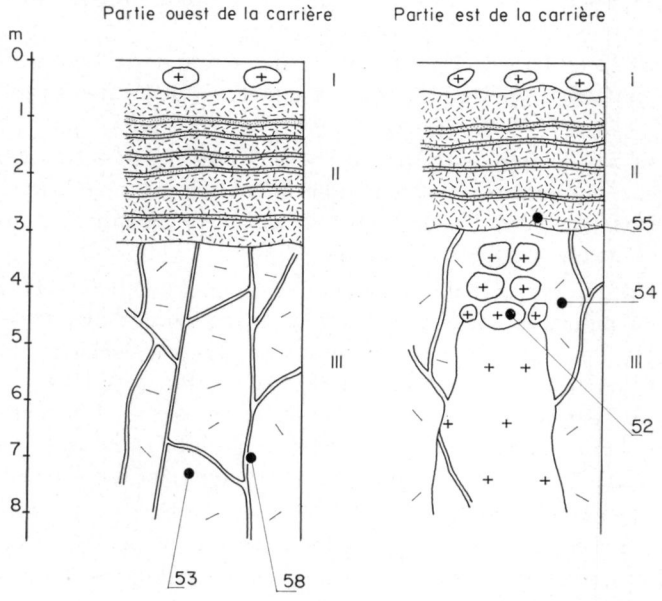
FIG. 5. — *Coupe de Saint-Brisson*
Granite à grain moyen

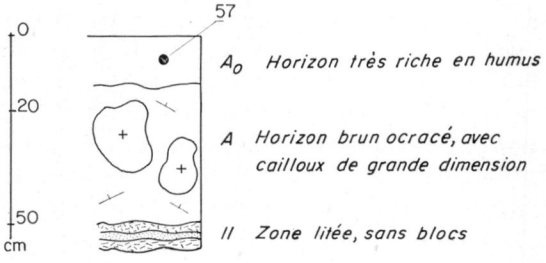
d) *Granite à grain très fin.*

Quand la dimension des grains se réduit et atteint presque celle des filons aplitiques, la résistance des granites du Morvan s'accroît, ce qui tendrait à prouver qu'à ce niveau, une corrélation peut exister entre la finesse de la structure et la dureté de la roche. En particulier, le granite d'Eschamps (nº 60), bien que truffé d'un important réseau de diaclases qui le fragmente, n'est pas arénisé. Quant au granite de la Roche-en-Brenil (nº 63) mylonitisé, et à grain très fin, il est sans conteste le plus résistant de tous ceux observés dans le périmètre prospecté.

2º *Morphologie similaire des zones d'altération et des sols*

Hormis quelques retouches, qui feront l'objet d'une discussion dans un prochain paragraphe, les profils offrent une architecture tout à fait comparable d'une situation à l'autre, et ressemblent également à ceux des granites à Biotite, si bien que la présentation de l'un d'entre eux suffira à en donner une physionomie générale. Ils ont d'ailleurs été décrits pour l'ensemble du Morvan dans les thèses de Jacqueline BEAUJEU-GARNIER (1951) et Jacqueline BONNAMOUR (1966), et ressemblent en tout





I Zone solifluée avec horizon à cailloux

II Zone solifluée, sans cailloux, mais présentant des couches d'arène finement litées

III Arène en place, avec de grandes diaclases, remarquablement soulignées par la circulation du fer

● Prélèvements

FIG. 6. — *Coupe de Saint-Agnan*
Granite à grain fin

point à ceux décrits en d'autres régions, par de nombreux auteurs, et en particulier D. COLLIER (1951 et 1961) dans le Massif central.

Le profil n° 22 en face de la chapelle du Monastère de la Pierre-qui-Vire, a été retenu comme type (fig. 3). De la base au sommet, on distingue les formations suivantes :

La Roche altérée C_3, parcourue par de nombreuses fissures, caractérisée surtout par l'apparition d'une patine qui diminue l'éclat des cristaux de la roche saine. Ici, on assiste à un passage latéral à un granite de structure planaire C_2, où les diaclases parallèles lui donnent une allure stratoïde.

L'arène C_1, de 5 à 6 m d'épaisseur, où la roche a subi une puissante désagrégation physique qui l'a réduite à l'état meuble, tout en conservant une grande cohérence à l'affleurement. On note l'intense pulvérisation des Plagioclases transformés en poudre blanche, la résistance des Quartz et des Feldspaths potassiques, — ces derniers peuvent tout au plus se fragmenter et non se pulvériser — la conservation de la Muscovite dans l'état où on la découvre dans le granite frais, et le comportement variable de la Biotite, qui peut être intacte, ou au contraire plus ou moins mordorée.

Le sol, d'épaisseur variable — 15 cm dans le cas étudié — surmonte l'arène dont il dérive ; le passage de la zone d'altération au sol peut être brutale, ou au contraire s'effectuer par des transitions ménagées qui indiquent des caractéristiques morphologiques intermédiaires entre celles de l'arène et du sol proprement dit. Celui-ci peut comporter deux horizons : un A_0 parfois épais sous couvert forestier où dominent les feuillus, de coloration très foncée, riche en matières organiques, et un horizon A_1, brun, avec de nombreux cailloux, très meuble, où la circulation de l'eau s'effectue avec facilité, et où l'exploration des racines n'est contrecarrée par aucun obstacle. L'évolution de ces sols est d'ordinaire peu accusée du moins en dehors des forêts et le qualificatif de « sol brun jeune » peut leur être appliqué.

Toutefois, des paléosols peuvent venir s'interposer entre l'arène et le sol actuel mettant ainsi en lumière la complexité de la pédogenèse en Morvan : citons notamment les paléosols observés à Eschamps, à la Ferme-des-Plaines, près de Saulieu, à la sortie du bourg de Saint-Brisson, tout près de la route Montsauche-Saulieu, et aux Chéraux dans le Bois-de-la-Pinarde.

3° *Incidence marquée de la topographie sur la formation des arènes*

Si le Morvan Nord est ainsi recouvert dans son ensemble par une arène relativement épaisse, en position de plateau, cette couverture s'estompe quel que soit le faciès, lorsque la topographie s'accuse et tout comme A. RONDEAU (1961) l'avait noté pour les granites de Corse, on peut indiquer que *la profondeur de l'altération varie en raison inverse de la pente* ; ainsi, les versants abrupts des vallées de la Cure, du Trinquelin, du Vernidard et du ruisseau de Tancoin au sud de Quarré-les-Tombes sont-ils immunisés.

Un itinéraire est particulièrement riche d'enseignement à cet égard : c'est celui de la Forêt-de-Breuil (fig. 7). Au-delà de la route forestière à la cote 530, la rupture de pente entraîne la disparition de l'arène ; seuls demeurent des blocs de grande taille, enchâssés dans un sol de 40 cm d'épaisseur, recouvrant directement le substrat.

La formation des arènes est donc sous la dépendance étroite de la topographie, dont les traits majeurs ont été élaborés lors de l'installation au Tertiaire du réseau hydrographique actuel qui à la faveur de grandes fractures, a sectionné la surface d'érosion antétriasique en compartiments orientés d'une façon remarquablement

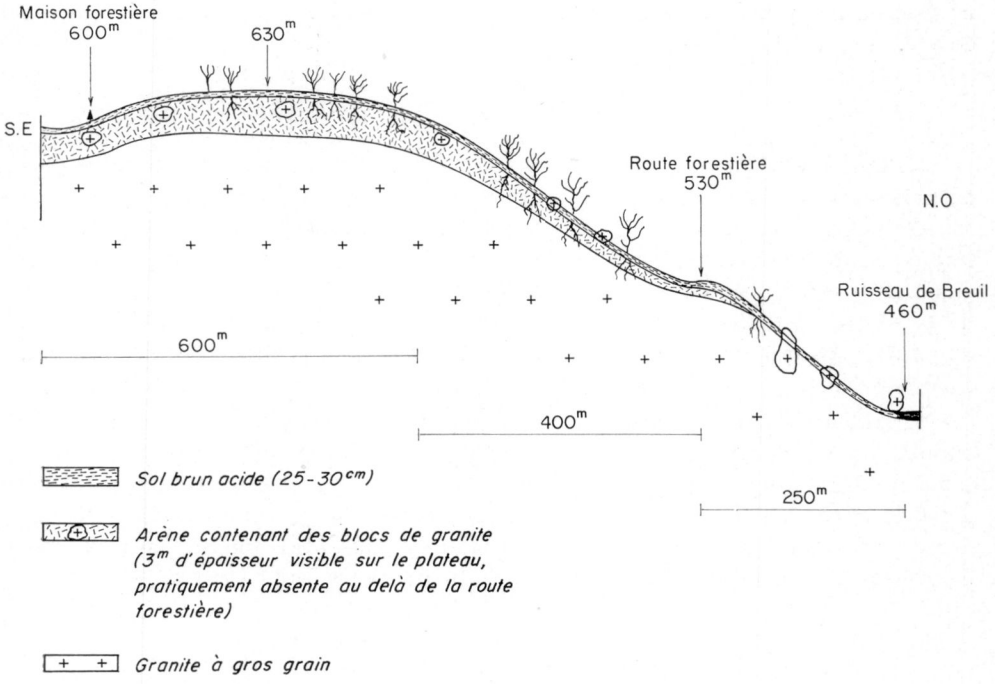


FIG. 7. — *Coupe dans la forêt de Breuil*
Influence de la topographie sur la formation des arènes

similaire Sud-Est-Nord-Ouest, si l'on en juge par la direction des deux rivières principales, la Cure et le Trinquelin rigoureusement parallèles. Depuis le creusement de ces vallées, toute trace de produits altérés qui auraient pu ou qui pourraient encore s'élaborer sur les versants a été entraîné, la sédimentation n'étant possible que dans les zones où la pente des rivières s'amoindrit et où la vallée s'élargit.

II. — CARACTÈRES PARTICULIERS DE L'ALTÉRATION DE CES GRANITES

L'altération des granites de la Pierre-qui-Vire présente un certain nombre de caractéristiques particulières, venant rompre la monotonie générale du phénomène et que nous allons désormais passer en revue.

1° *Structure planaire de certains gisements*

Il n'est pas rare de rencontrer dans le massif étudié des profils où l'on peut observer, de façon typique, une structure planaire, caractérisée par une fragmentation de la roche par un système de diaclases parallèles à la topographie. Cette

altération en strates est toujours superficielle et contribue à hâter la désagrégation physique. De beaux exemples peuvent être cités le long de la vallée de la Cure entre le pont du Montal et le confluent du Vignan, autour du Monastère de la Pierre-qui-Vire où elle affecte aussi bien le granite à Biotite de Saint-Léger que les granites à 2 micas (fig. 2 et 3), au sud de Saint-Agnan sur la route D. 226 menant à Saint-Brisson où elle provoque la dislocation locale d'un granite à grain fin, d'une grande dureté.

2° *Chaos de blocs et présence de cupules*

Comme il est classique dans les formations granitiques, des blocs de taille plus ou moins grande, et qui s'agencent en chaos, échappent à l'arénisation, quelle que soit d'ailleurs la dimension du grain. Ce sont les « Roches » et « Rochers » du Monastère de la Pierre-qui-Vire, des Fées, des Guichards, du bois de Nisserteau. Correspondent-ils à une ancienne surface d'érosion située à quelques mètres au-dessus de la surface actuelle, l'arène qui les aurait enchâssés ayant été déblayée ? Cette hypothèse apparaît plausible, car ils sont localisés à des altitudes très voisines, comprises entre 515 et 520 mètres.

Il faut aussi noter, dans ce massif si intéressant à tous égards, la présence de cupules, souvent profondes, de forme ovalisée, tout à fait comparables aux célèbres taffonis des granites de Corse décrits en particulier par A. RONDEAU (1961) dans le golfe de Porto. Les exemples les plus remarquables s'observent ici à la Roche-des-Fées, au sud de Quarré-les-Tombes, et à la Roche-du-Chien, sur les énormes blocs de granite à Tourmaline qui encombrent le lit du ruisseau du Vignan.

3° *Manifestations périglaciaires*

Les manifestations périglaciaires attribuées en Europe au Würmien, à la suite notamment de travaux palynologiques (Y. GUILLIEN, 1965) et qui avaient été décrites dans le massif porphyroïde de Lormes par J. ANDRÉ et *al.* (1955), se retrouvent aussi dans celui de la Pierre-qui-Vire, où elles revêtent une grande importance.

La solifluxion apparaît en plusieurs sites, affectant les diverses catégories de matériaux granitiques, et de nombreux versants en portent les marques ; le phénomène peut d'ailleurs se manifester suivant des intensités variables où l'intervention de la pente joue un rôle déterminant. On pourra observer ses effets notamment au sud de Bornoux, où il y a fauchage des couches supérieures d'une arène, et le long de la route Montsauche-Saulieu sur le versant du Bois-Rapé, où le phénomène intéresse une grande superficie ; ici, l'épaisseur de l'arène solifluée contenant des blocs de granite de différents faciès et reposant sur une arène formée *in situ* varie entre 2 et 3 m. Mais le profil où ces phénomènes de transport sont les plus nets et aussi les plus complexes, est celui de Saint-Agnan (n° 51) sur le versant du Bois-de-la-Chevrée (fig. 6).

Cette coupe montre depuis la base jusqu'au sommet, trois zones distinctes parfaitement tranchées :

a) *La zone III* correspond à une puissante couche d'arène, formée *in situ*, et

dont l'épaisseur observable est de l'ordre de 4 à 5 m. Il s'agit d'un matériel fin, très altéré physiquement, parcouru par un réseau serré de grandes diaclases réunies par d'autres de dimension plus réduite, toutes remarquablement soulignées par une coloration rouge spécifique de la migration du fer, coloration qui n'affecte que très peu la masse de l'arène elle-même.

b) *La zone II*, dont l'épaisseur varie entre 2 et 3 m, est solifluée et parfois rubéfiée ; elle se présente comme une succession de couches d'arène régulièrement litées, ressemblant à un dépôt sédimentaire, avec toutefois des différences au point de vue granulométrique, certaines strates s'avérant plus fines que d'autres. Ce litage se retrouve presque identique dans les arènes granitiques solifluées à Brassy et à Vermot près de Dun-les-Places. Il s'agit d'un transport effectué de façon lente, épisodique, régulier puisqu'il donne des dépôts ordonnancés, et sans doute de faible puissance puisqu'il n'a affecté que du matériel meuble, où la présence de blocs est exclue. On peut songer à une solifluxion de type nivéal, saisonnière par conséquent, pendant laquelle les conditions d'entraînement demeurent sensiblement uniformes, chaque épisode pouvant être marqué par une granulométrie particulière, fonction elle-même de la dynamique du phénomène.

c) *La zone I*, solifluée, correspond à un sol formé de 2 horizons distincts : A_0 (0-15 cm), noir, très riche en humus, occupé par la forêt comprenant chênes, bouleaux et une abondante production de fougères et de genêts. Un horizon A (15-40 cm) lui fait suite, de couleur brun ocracé, mais contenant des blocs d'un granite à gros grain atteignant de grandes dimensions. Cette nouvelle phase de transport contraste donc fortement avec la précédente, puisqu'elle traduit un épisode plus violent, qui a réussi à arracher des blocs n'appartenant pas d'ailleurs au substrat. Cet horizon à cailloux se rencontre en maintes situations en Morvan, et indique un épisode quasi-généralisé sur les versants.

4° *Rubéfaction de certaines arènes*

Une autre caractéristique très importante à signaler est la rubéfaction de certaines arènes granitiques. Le phénomène apparaît fréquemment en Morvan-Nord, affectant aussi bien les zones d'altération sur granite porphyroïde — l'arène observée près du cimetière de Brassy notamment est d'une coloration rouge très intense — que celles sur granites à 2 micas.

Mais, le phénomène revêt suivant les profils une intensité variable. Très discret et discontinu à Saint-Agnan. il est un peu plus accusé dans les arènes de la Forêt de Breuil, pour atteindre une intensité marquée dans celles de Saint-Germain-le-Haut, Champ-au-Beau, Grandvault, les Michaux et les Ruez, et enfin Moulin-Colas.

De plus, cette rubéfaction n'offre pas le même aspect d'un point à un autre. Elle peut intéresser l'ensemble de l'arène, comme à Grandvault ; ailleurs, elle respecte une partie de la zone altérée ou n'affecte simplement qu'un niveau localisé à un point quelconque du profil.

Discontinuité et hétérogénéité caractérisent donc cette altération qui mériterait à elle seule une étude spéciale.

Ainsi, à côté de caractères généraux qui assignent à l'arénisation des granites

à 2 micas de la Pierre-qui-Vire une homogénéité indiscutable, un certain nombre de retouches, parfois très importantes, ont modifié la disposition initiale des profils, et créé une certaine diversité d'aspect au sein du massif.

III. — Intensité de l'altération physique des granites a 2 micas

Analyses granulométriques

Les coupes suivantes, représentatives des 3 faciès principaux ont été retenues pour l'étude de l'altération physique et chimique des granites à 2 micas du Morvan-Nord. Elles figurent sur les schémas 3 à 6 tandis que les annexes I et II précisent de façon plus détaillée que les indications de ce paragraphe, leur situation géographique ainsi que la nature des échantillons examinés.

N° 14-15 et 24-25	Granite à gros grain	Monastère de la Pierre-qui-Vire.
N° 93-96	Granite à gros grain	Bois-des-Montées.
N° 73-74	Granite à grain intermédiaire	Saint-Brisson.
N° 53-58	Granite à grain fin	Saint-Agnan.
N° 43-46	Granite à Biotite seule (choisi comme terme de comparaison)	Forêt de Saint-Léger.

Les analyses granulométriques (tabl. 1) nous permettent d'apprécier l'ampleur de la désagrégation physique de ces roches. Il s'agit, quel que soit le faciès, d'une fracturation offrant un degré d'intensité fort variable d'un gisement à l'autre, si l'on note que la fraction < 2 mm des arènes prélevées entre 150 et 250 cm peut ne représenter que 15 p. 100 du total au Monastère de la Pierre-qui-Vire et au contraire 77 p. 100 à Saint-Agnan.

Cette pulvérisation dont le mécanisme a été précisé par G. Pedro (1959), et tout récemment par M. Robert (1966), s'accroît de façon continue depuis la zone du granite altéré jusqu'au sol, où elle atteint son maximum d'acuité. Si l'on ne considère que la fraction < 2 mm, les arènes profondes sont composées surtout de matériel relativement grossier, compris entre 200 et 2 000 μ qui représente à lui seul dans tous les faciès au moins 60 p. 100 du total et parfois 80 p. 100. Le taux de l'argile est alors très bas : 1,25 à 6 p. 100. Quant à la répartition des fractions < 2 mm, elle s'avère assez homogène, au point que des arènes aussi dissemblables morphologiquement que celles sur granite à Biotite de Saint-Léger et granite à faciès fin de Saint-Agnan ont une composition granulométrique voisine.

Au fur et à mesure que l'on s'élève vers le sommet du profil, on observe une augmentation continue de l'argile et du limon et une diminution corrélative des sables, les éléments 200-2 000 μ étant ceux dont la proportion s'abaisse le plus. Ces variations sont surtout sensibles quand on passe de l'arène au sol dont les horizons se distinguent ainsi de façon nette de la couche arénisée par leurs caractéristiques physiques divergentes.

Traitement statistique des courbes cumulatives

Les courbes cumulatives, représentatives de la composition granulométrique des arènes et des sols sur granites à deux micas, ont été établies suivant la technique utilisée au Laboratoire de Géographie de la Faculté des Lettres de Dijon (1955). Rappelons brièvement que les diamètres des particules croissent sur l'axe des abscisses jusqu'à 20 mm, les nombres de la série AFNOR étant doublés par l'échelle arbitraire alpha, tandis que les fréquences cumulées figurent en ordonnées.

Le dépouillement des différents diagrammes permet de distinguer deux types morphologiques (fig. 8) :

1. *une courbe représentative des arènes,* assez proche du type n° 1 décrite dans l'ensemble du Morvan par S. Mériaux (1962), et ceci quel que soit le faciès, comportant une partie en S au-dessus de 250 μ environ et une partie presque rectiligne en dessous de 250 μ ;

2. *une courbe représentative des sols,* apparentée au type 3 de l'auteur précité, toujours située

au-dessus de la courbe 1, affectant la forme d'un S moins accusé, non biphasée dans la majorité des cas.

Ainsi, il est aisé de distinguer arènes et sols d'après l'allure de ces courbes cumulatives, qui extériorisent de façon graphique les différences granulométriques.

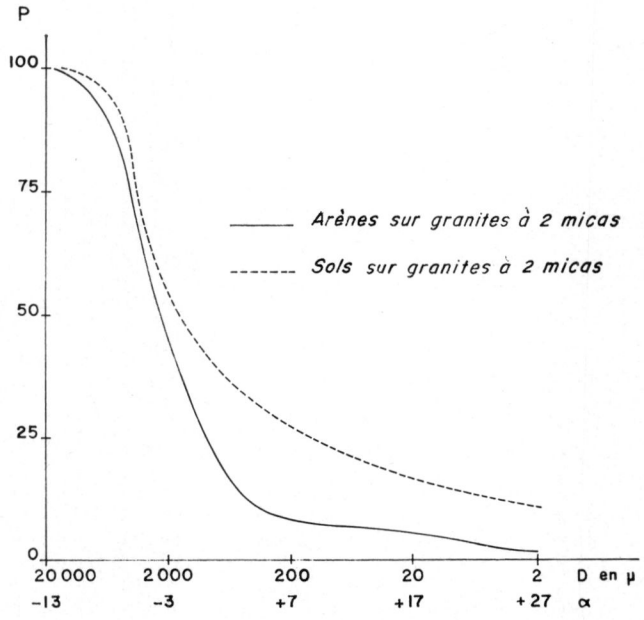


FIG. 8. — *Types de courbes cumulatives*

Discussion des résultats : paramètres statistiques

Un certain nombre de paramètres statistiques ont été calculés à la suite de l'établissement des courbes cumulatives et les résultats sont consignés dans le tableau 2.

Ces analyses mettent en évidence de façon plus nette que la composition granulométrique, le développement de l'altération physique globale depuis l'arène jusqu'au sol, les valeurs de la médiane M_d et de la moyenne arithmétique M_x diminuant de façon progressive et continue. S'il n'est pas possible d'après les quelques exemples retenus de différencier l'altération des granites à gros grain de celle des granites à grain intermédiaire, par contre, le type à grain fin de Saint-Agnan est bien caractérisé par des valeurs de M_d et M_x nettement plus faibles.

Les paramètres de dispersion permettent de classer également arènes et sols sans qu'il soit possible toutefois de caractériser les différents types issus des trois roches-mères fondamentales. Le coefficient SO indique un bon classement, dans la partie centrale de la distribution pour les arènes, et médiocre ou mauvais pour les sols, K ne varie qu'entre de faibles limites. La pente de Trask SK montre une légère asymétrie autour de la médiane dans les arènes et une asymétrie relativement poussée dans les sols.

Quant aux valeurs de As constamment positives, elles indiquent que ce sont les éléments fins les plus hétérogènes dans tous les spectres granulométriques.

T

Analyse des profils du m

N° échantillon	Profondeur	Cailloux	Graviers	Terre fine	Argile	Limon	Sables très fins	Sables f
	(cm)	> 5 mm	2-5 mm	< 2 mm	< 2 µ	2-20 µ	20-50 µ	50-200
14	100-150	61,4		38,6	6,0	6,50	5,50	10,50
15	3-25	41,0		59,0	16,9	16,63	6,73	9,30
24	150-200	58,0	27,0	15,0	2,15	5,07	2,80	16,50
25	3-15	24,0	20,0	56,0	14,00	12,20	6,10	13,40
43	250-300	73,0		27,0	6,07	8,88	5,49	12,51
44	100-130	68,6		31,4	11,15	8,20	5,62	17,20
45	8-40	40,0		60,0	11,75	13,00	5,30	13,62
46	0-8	34,2		65,8	11,75	11,65	4,70	10,05
53	650-800	3,0	17,0	80,0	2,53	8,60	3,50	12,62
54	350-400	8,0	30,0	62,0	5,43	11,35	4,35	14,90
55	250-300	5,0	17,5	77,5	8,66	10,50	4,17	16,00
56	15-40	4,7	18,0	77,3	13,10	11,70	5,72	10,68
57	0-15	14,4	20,2	65,6	10,55	11,75	5,00	7,65
58 *	600-800	5,8	5,5	88,7	2,90	14,90	8,00	26,00
73	100-150	24,0	28,0	48,0	1,25	5,38	3,35	14,00
74	20-30	18,0	18,0	64,0	18,05	12,35	7,45	13,25
90	100-125	6,0	44,0	50,0	11,20	8,30	3,70	14,55
93	150-200	14,0	41,0	45,0	3,30	8,55	2,70	3,90
94	40-50	7,2	39,2	53,5	18,70	12,90	4,45	13,40
95	25-40	6,0	30,0	64,0	15,65	12,15	5,55	10,90
96	0-8	3,7	26,0	70,3	5,95	9,80	7,05	12.80

* L'échantillon 58 a été prélevé dans une fissure.

U I

la Pierre-qui-Vire

Analyse de la terre fine < 2 mm

Sables grossiers		H_2O à 105°	Matière organique	Total	C p. 1 000	N p. 1 000	C/N	pH
200-500 µ	500-2 000 µ							
68,00		1,70	0,28	98,48	1,60	0,10	16,0	5,3
46,42		1,54	3,16	100,68	18,10	0,65	25,8	4,8
21,20	50,70	0,70		99,12				5,0
13,90	34,30	1,86	3,95	99,70	22,55	1,35	16,7	4,7
21,81	43,21	0,97		98,94		tr.		4,7
18,93	37,03	1,22	tr.	99,35		0,10		4,7
15,85	34,82	1,51	3,04	98,90	17,40	0,95	18,3	4,4
13,25	34,50	2,50	11,95	100,35	68,40	3,40	20,0	4,2
27,45	44,43	0,68		99,13				5,2
19,95	41,60	0,95		98,53				5,0
25,92	34,22	1,50		100,97				4,8
15,60	35,90	2,00	4,30	99,03	24,60	1,60	15,4	4,5
16,10	27,50	3,30	20,90	101,75	119,40	5,45	21,9	4,1
26,40	18,90	1,36	0,53	99,00	3,05	0,20	15,3	5,0
17,30	57,30	1,60	0,20	100,38	1,23	0,08	15,6	5,0
17,30	24,80	2,60	3,22	99,02	18,45	1,05	17,6	4,9
19,95	40,40	1,84	0,35	100,29	2,00	0,10	20,0	5,0
6,80	73,70	1,20	0,85	101,00	4,95	0,20	24,7	4,9
13,00	34,30	1,40	1,60	99,75	9,40	0,40	23,5	4,8
11,20	40,00	2,15	3,30	100,90	19,10	0,80	23,8	4,8
11,65	33,00	2,70	17,60	100,55	133,50	5,50	24,3	4,0

TABLEAU 2

Caractéristiques des courbes cumulatives du Morvan-Nord, construites avec l'ensemble des particules : 2-20 000 μ

Échantillon	Origine et profondeur (en cm) du prélèvement	Médiane M_d (en μ)	Moyenne arithmétique M_x (en μ) (1)	Écart interquartile SO	Acuité interquartile K	Pente de Trask SK	Écart-type σ_α	Asymétrie AS
	Arène et sol sur granite à biotite							
43	Forêt de Saint-Léger (250-300)	4 200	2 150	1,7	0,26	0,5	6,7	+ 1,3
44	Forêt de Saint-Léger (100-130)	4 200	1 900	2,6	0,30	0,3	8,0	+ 1,2
44	Forêt de Saint-Léger (8-40)	1 250	600	4,9	0,26	0,25	9,5	+ 1,05
	Arène et sol sur granite à gros grain							
14	La Pierre-qui-Vire (100-150)	2 800	1 460	2,6	0,28	0,38	7,3	+ 1,2
15	La Pierre-qui-Vire (3-25)	1 090	585	9,3	0,26	0,11	11,7	+ 0,2
24	La Pierre-qui-Vire (150-200)	5 200	3 700	1,3	0,20	0,85	5	+ 0,9
25	La Pierre-qui-Vire (3-15)	1 440	720	5,6	0,25	0,33	9,7	+ 0,9
93	Bois-des-Montées (150-200)	2 300	1 600	2,0	0,25	0,7	6,7	+ 0,7
94	Bois-des-Montées (40-50)	1 600	620	5,0	0,36	0,2	9,6	+ 1,2
95	Bois-des-Montées (25-40)	1 140	470	5,0	0,33	0,2	9,5	+ 1,2
96	Bois-des-Montées (0-8)	880	460	4,9	0,30	0,25	7,7	+ 1,6
	Arène et sol sur granite à grain moyen							
73	Saint-Brisson (100-150)	2 200	1 520	2,75	0,25	0,65	7,0	0,7
74	Saint-Brisson (20-30)	650	510	8,9	0,22	0,35	10,3	0,5
	Arène et sol sur granite à grain fin							
54	Saint-Agnan (350-400)	1 040	700	3,2	0,28	0,7	8,1	+ 0,6
55	Saint-Agnan (250-300)	480	385	3,7	0,22	1	8,3	+ 0,4
56	Saint-Agnan (15-40)	550	325	6,1	0,23	0,25	9,1	+ 0,75
57	Saint-Agnan (0-15)	800	500	5,4	0,24	0,50	9,6	+ 0,65

(1) Moyenne pondérée des valeurs de chaque classe.

ÉTUDE DES CONSTITUANTS DES ARÈNES ET DES SOLS

I. *Examen des sables à la loupe binoculaire*

Une quinzaine d'échantillons d'arènes et de sols prélevés dans les profils retenus comme types ont été examinés à la loupe binoculaire, après qu'ils aient été soumis aux différents traitements de l'analyse granulométrique, qui ont provoqué un excellent décapage des sables, permettant ainsi des observations faciles. Celles-ci ont été effectuées sur l'ensemble des fractions comprises entre 20 et 2 000 μ ; la répartition des minéraux et leur état d'altération, appréciés dans chaque fraction, sont résumés dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Répartition des minéraux et état de leur altération dans les diverses fractions des arènes et des sols

(Observations valables pour les 3 faciès granitiques)

	Fraction 2 000-500 μ	Fraction 500-200 μ	Fraction 200-50 μ	Fraction 50-20 μ
Minéraux observés	Quartz hyalin	Quartz	Quartz plus ou moins translucides	
		et		
	Feldspaths K individualisés	Feldspaths K individualisés	Peu de Feldspaths	Identification très délicate des minéraux
	Plagioclases réduits en poudre	Plagioclases en poudre		
	Assemblages Quartz-Phyllites Quartz-Feldspaths K	Très peu d'assemblages		
	Muscovite intacte	Accroissement du pourcentage des phyllites	Concentration de la Muscovite et de la Biotite bauéritisée dans cette fraction	Muscovite brillante
	Biotite peu bauéritisée	Bauéritisation de la Biotite plus accusée		Biotite très mordorée

II — *Étude des argiles extraites des arènes et des sols du massif de la Pierre-qui-Vire*

1. *Techniques utilisées.*

Les résultats de plusieurs techniques ont été confrontés au cours de cette étude.

1. *Diffractométrie aux rayons X.* — Elle a été effectuée par Mme J. MERGOIL au Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand. Les essais ont porté à la fois sur les échantillons naturels et traités à 550°C.

2. *Analyses thermo-pondérales.* — Elles ont été exécutées par Mlle C. BARRAU, également au Laboratoire de Géologie de Clermont.

3. *Capacité d'échange de cations* — C. E. C. exprimée en méq. pour 100 grammes d'argile. Percolation par l'acétate d'NH_4 et lavages à l'alcool éthylique à 95°.

4. *Mesures des surfaces totales.* — Elles sont dues à J. GUYOT qui a suivi la technique de R.S. DYAL et S. B. HENDRICKS (1950), perfectionnée ensuite par C. A. BOWER et J. O. GOERTZEN (1959), consistant à suivre la cinétique de l'évaporation de l'éthylène-glycol.

L'évaluation de la proportion et de la nature des réseaux expansibles dans un mélange argileux a été calculée à la suite de la construction des courbes d'évaporation de l'éthylène-glycol : $\Delta p = f(t)$, suivant la technique de J. C. NADEAU (1961).

5. *Mesures des surfaces externes.* — Elles ont été appréciées par J. GUYOT grâce au procédé B. E. T., mais en utilisant l'adsorption du butane pur à 0° au lieu de l'azote à basse température (J. CHAUSSIDON, 1961).

6. *Analyses chimiques totales.* — Technique de Jeanne ORLIAC (1961), utilisée au Laboratoire de Géologie de Clermont.

Echantillons traités.

Huit échantillons de matériel argileux $< 2\ \mu$ extraits des arènes et des sols ont été examinés ; ils ont été choisis parmi les trois faciès fondamentaux constituant le massif granitique.

2) *Résultats et critique des diverses techniques.*

1. *Rayons X.*

Les diffractogrammes obtenus ne sauraient refléter dans sa totalité la composition minéralogique des échantillons, car ils ne donnent pas les distances réticulaires supérieures à 10 Å, dont l'identification aurait été fort précieuse dans les cas envisagés, et ils ne peuvent confirmer de ce fait les mesures de surface mettant en évidence des réseaux expansibles. De plus, l'établissement de ces diagrammes s'est révélé délicat, en raison de la médiocre cristallisation des échantillons, et de plus, eu égard à la largeur des pics, les distances réticulaires calculées ne sont qu'approximatives.

Le dépouillement de ces documents, bien qu'incomplets, indique des analogies certaines entre les échantillons 441, 541, 561, 581, 731, 941.

On reconnaît à la suite des données de R. E. GRIM (1953), J. LUCAS et *al.* (1959) et G. BROWN (1961) la présence de minéraux de la famille de la Kaolinite et de l'Illite, alors que la raie à 3,34Å très intense est attribuée à une Phyllite sans qu'il soit possible de différencier la Biotite ou la Muscovite qui possèdent toutes deux cette même raie fondamentale.

Mais, plusieurs échantillons présentent toutefois des raies particulières très remarquables.

Argiles 141 et 241. — Toutes deux récoltées au Monastère de la Pierre-qui-Vire, dans des arènes distantes tout au plus de 200 m l'une de l'autre, et toutes deux dans une tranche de profil comprise entre 100 et 200 cm au-dessous de la surface du sol, elles montrent de légères modifications dans les équidistances réticulaires par rapport aux précédentes, mais qui n'en modifient pas moins le diagnostic. Les diffractogrammes indiquent, en effet, les réflexions diffuses suivantes :

Échantillon normal n'ayant subi aucun traitement		Échantillons chauffés 550°C	Halloysite non hydratée A. P. I. 13 de M. W. MOLLOY et P. F. KERR	
(001) 7,4 Å			7,4 Å	très intense
7,27	très intense			
4,44	très intense		4,42	très intense
4,33-4,14	zone de réflexion diffuse	Disparition de toute réflexion	4,34	
(002) 3,56	très intense		3,58	très intense
2,56	intense		2,57	moins intense
2,49	moins intense		2,50-2,52	moins intense
(003) 2,35	zone de réflexion diffuse		2,33-2,29	moins intense
1,69-1,65	zone de réflexion diffuse		1,90-1,67	moins intense

Ainsi, les résultats sont différents de ceux obtenus pour les autres échantillons et indiquent que l'on se trouve en présence d'une Halloysite peu hydratée. Les analogies entre les diagrammes présentés par Mme J. MERGOIL et ceux de M. W. MOLLOY et P. F. KERR (1961) pour une Halloysite d'Eureka, en Utah, sont très frappants. En particulier d'excellents indices viennent à l'appui de cette

hypothèse de détermination : la présence de la raie à 7,4 Å avec de plus son dédoublement à 7,27 Å, propriété classique de l'Halloysite signalée par R. GRIM (1953). Les réflexions diffuses à 4,33 Å et 2,35 Å sont aussi caractéristiques et traduisent d'après M. W. MOLLOY et P. F. KERR (1961) un désordre dans la structure. Enfin, le comportement de ces argiles à 550°C, où toutes les raies sont détruites est un argument de plus en faveur du diagnostic proposé.

Une seule difficulté cependant dans l'interprétation des diffractogrammes : les raies de l'Illite n'ont pas apparu dans l'échantillon normal, pas plus qu'à 550°C. Pourtant la proportion de ce minéral n'est pas inférieure à celle des autres échantillons. Peut-être sa mauvaise cristallisation est-elle la cause de ce résultat.

Argile 941. Le diffractogramme de cet échantillon ne subissant aucun traitement montre la présence de 2 raies très intenses fort inattendues, qui disparaissent au chauffage à 550°C. Les équidistances réticulaires de 4,84 Å et 4,36 Å caractérisent en effet la Gibbsite (G. BROWN, 1961) pour laquelle il est normal de noter la destruction des 2 raies à 550°C.

Les calculs présentés ultérieurement confirmeraient aussi l'existence de cet hydrate d'Al. Mais, le rayonnement X ne l'a découvert dans aucun autre échantillon du massif, dont nous avons vu, au cours du premier mémoire, la grande homogénéité d'ensemble de la composition minéralogique. Aussi, ce résultat ne saurait être proposé qu'avec prudence.

2. *Analyses thermo-pondérales.*

Les analyses thermo-pondérales, dont quelques exemples de courbes figurent dans le schéma 9. affectent des allures très voisines, traduisant une parenté accusée entre les différents échantillons. Toutes montrent un crochet de faible amplitude entre 100° et 150°, attribué à l'Illite, suivi d'un accident plus ou moins marqué entre 250° et 400°, dû aux oxydes de fer hydratés de type Goethite.

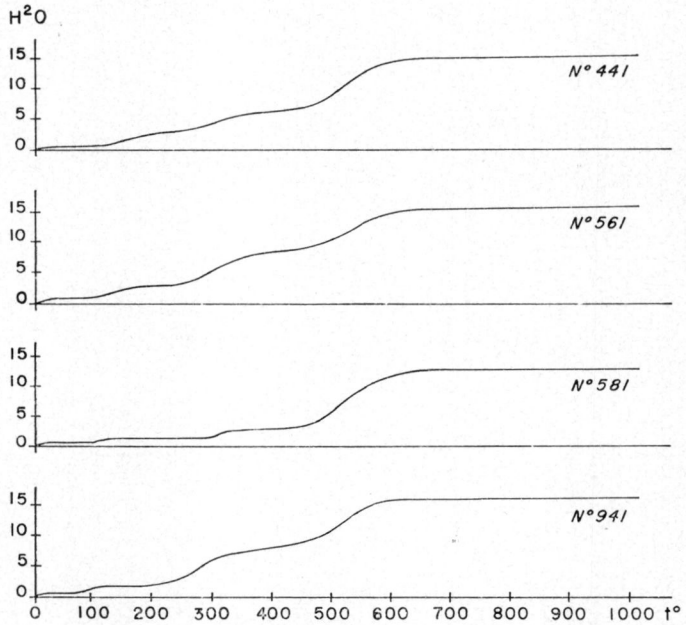


FIG. 9. — *Courbes thermo-pondérales*
Argiles du Massif de la Pierre-qui-Vire

Il faut aussi signaler que dans l'échantillon 941 du Bois des Montées, pour lequel les rayons X laisseraient prévoir la présence de Gibbsite, l'accident thermique entre 200° et 450° est le plus accusé : 4,75 p. 100 de perte d'eau entre 220° et 325° et 2,6 p. 100 entre 325° et 440° ; si l'on sait qu'à la suite de la détermination du fer libre, celui-ci ne représente que 2 p. 100 Fe_2O_3, soit 0,34 p. 100 d'H_2O pour former la Goethite, il est tentant de rapporter cette importante perte de poids à l'élimination de l'eau de constitution de la Gibbsite.

Enfin, toutes les courbes accusent un crochet important entre 500° et 600°, attribué au départ de l'eau de constitution de la Kaolinite.

TABLEAU 4

Résultats des analyses du matériel argileux du massif de la Pierre-qui-Vire

Constituants chimiques	Argile 441 Extraite de l'arène superficielle (100-130 cm) Granite à biotite de la forêt de Saint-Léger An. nº 101 Mme C.CHAUMONT Châteauroux : septembre 1965	Argile 141 Extraite de l'arène superficielle (100-150 cm) Granite à 2 micas à gros grain Monastère de la Pierre-qui-Vire An. nº 18 Mme M. JACQUIN J. DEJOU Dijon : juillet 1964	Argile 241 Extraite de l'arène nº 24 (150-200 cm) Granite à 2 micas à gros grain en face chapelle du Monastère la Pierre-qui-Vire An. nº 54 Mme M. JACQUIN Mlle C. FICHOT Dijon : juillet 1964	Argile 541 Extraite de l'arène nº 54 (350-400 cm) Granite à 2 micas à grain fin de Saint-Agnan An. nº 55 Mme M. JACQUIN Mlle C. FICHOT Dijon : juillet 1964	Argile 561 Extraite du sol soliflué (15-40 cm) Granite à 2 micas de Saint-Agnan An. nº 56 Mme M. JACQUIN Mlle C. FICHOT Dijon : juillet 1964	Argile 581 Extraite d'une diaclase au sein de l'arène profonde (600-800 cm) Saint-Agnan An. nº 33 P. AUBRY J. DEJOU Dijon : janvier 1964	Argile 731 Extraite de l'arène nº 73 (100-150 cm) Granite à 2 micas à grain moyen de Saint-Brisson An. nº 100 Mme C.CHAUMONT Châteauroux : août 1965	Argile 941 Extraite du sol (40-50 cm) Granite à 2 micas à gros grain du Bois-des-Montées An. nº 57 Mme M. JACQUIN Mlle C. FICHOT Dijon : juillet 1964
H_2O^-	3,16	2,43	1,55	0,94	1,20	0,73	3,15	1,00
H_2O^+	12,55	13,47	13,40	12,60	13,50	13,20	14,48	13,90
SiO_2	42,42	42,65	41,50	41,83	40,60	43,75	39,66	40,41
Al_2O_3	36,03	35,76	36,18	37,10	32,90	34,10	37,36	37,00
Fe_2O_3	2,33	2,28	4,15	5,00	7,50	3,26	2,95	5,43
FeO	0,20	0,21	0,52	0,18	0,52	0,34	0,20	0,52
TiO_2	0,38	0,24	0,34	0,36	0,66	0,50	0,26	0,45
P_2O_5	n. d.	0,15	0,26	0,34	0,24	n. d.	n. d.	0,13
MnO	n. d.	0,10	n. d.	0,05	n. d.	n. d.	n. d.	0,05
CaO	tr.	0,13	0,17	0,14	0,18	0,30	tr.	0,10
MgO	1,30	0,40	0,22	0,42	0,53	0,30	0,40	0,15
K_2O	1,35	1,15	0,89	0,67	1,47	1,41	1,00	1,12
Na_2O	0,18	0,76	0,36	0,10	0,22	1,48	0,40	0,12
Total	99,90	99,73	99,54	99,73	99,52	99,37	99,87	100,38

TABLEAU 4 (suite)

Rapports moléculaires C. E. C. et surfaces	Argile 441 Extraite de l'arène superficielle (100-130 cm) Granite à biotite de la forêt de Saint-Léger An. nº 101 Mme C.CHAUMONT Châteauroux septembre 1965	Argile 141 Extraite de l'arène superficielle (100-150 cm) Granite à 2 micas à gros grain Monastère de la Pierre-qui-vire An. nº 18 Mme M. JACQUIN J. DEJOU Dijon : juillet 1964	Argile 241 Extraite de l'arène superficielle (150-200 cm) Granite à 2 micas à gros grain en face chapelle du Monastère de la Pierre-qui-vire An. nº 54 Mme M. JACQUIN Mlle C. FICHOT Dijon : juillet 1964	Argile 541 Extraite de l'arène nº 54 (350-400 cm) Granite à 2 micas à grain fin de Saint-Agnan An nº 55 Mme M. JACQUIN Mlle C. FICHOT Dijon : juillet 1964	Argile 561 Extraite du sol soliflué (15-40 cm) Granite à 2 micas de Saint-Agnan An. nº 56 Mme M. JACQUIN Mlle C. FICHOT Dijon : juillet 1964	Argile 581 Extraite d'une diaclase au sein de l'arène profonde (600-800 cm) Saint-Agnan An. nº 33 P AUBRY J. DEJOU Dijon : janvier 1964	Argile 731 Extraite de l'arène nº 73 (100-150 cm) Granite à 2 micas à grain moyen de Saint-Brisson An. nº 100 Mme C.CHAUMONT Châteauroux août 1965	Argile 941 Extraite du sol (40-50 cm) Granite à 2 micas à gros grain du Bois-des-Montées An. nº 57 Mme M. JACQUIN Mlle C. FICHOT Dijon : juillet 1964
Bases totales % .	2,83	2,44	1,64	1,33	2,39	3,49	1,80	1,48
SiO_2/Al_2O_3	2,00	2,03	1,95	1,91	2,09	2,18	1,80	1,86
SiO_2/R_2O_3.....	1,92	1,95	1,82	1,76	1,83	2,05	1,72	1,70
H_2O^+/R_2O_3.....	1,90	2,05	1,95	1,77	2,19	2,07	2,09	2,09
Bases/R_2O_3	0,13	0,10	0,06	0,06	0,10	0,14	0,07	0,05
Fe_2O_3/R_2O_3.....	0,04	0,04	0,07	0,08	0,12	0,06	0,05	0,09
Fer libre en Fe %	1,6	n. d.	n. d.	3,34	3,95	1,08	1,80	n. d.
C.E.C. en méq. % grammes	26,70	22,45	26,00	17,50	32,40	15,8	24,9	22,5
Surface totale en m^2/g	120	107	54,50	69	96	55,7	83	106
Surface externe en m^2/g	65,5	75	54,10	35,3	52,7	44,3	46,75	57

An. J. GUYOT, Châteauroux)

3. *Mesure des surfaces.*

Les mesures exécutées par J. GUYOT (1965) ont permis de retrouver pour les échantillons du Morvan, les types fondamentaux de courbes de J. C. NADEAU (1961). La proportion de Montmorillonite ou de Vermiculite a été évaluée, compte tenu des données moyennes acquises pour les surfaces totales de ces minéraux : Montmorillonite : 800 m^2/g-Vermiculite : 550 m^2/g. Par exemple, dans l'échantillon 561 de Saint-Agnan, la couche bimoléculaire d'éthylène-glycol correspondait à une surface de 82 m^2/g d'argile, soit 10,25 p. 100 de Montmorillonite.

Pour deux échantillons : 242 et 581, on note l'absence de réseaux expansibles, les surfaces externes et totales étant pratiquement confondues.

4. *Analyses chimiques.*

Elles sont consignées dans le tableau 4 qui contient aussi les calculs des rapports moléculaires classiques, les résultats du Fer libre, ceux des C. E. C. en méq. pour 100 g et des surfaces en m^2/g. Des essais de détermination de la silice libre suivant le procédé de P. F. JANSSENS (1952) ont été entrepris, mais n'ont pas donné satisfaction ; il semble que les conditions de l'attaque sulfophosphorique doivent être revues, notamment la température et la durée de l'expérience, celles indiquées par l'auteur étant susceptibles de provoquer l'altération du réseau silico-alumineux.

Ces analyses chimiques expriment, par leurs analogies, une parenté certaine entre les divers échantillons. Les teneurs en SiO^2 et Al^2O^3 sont très voisines et les pourcentages de K^2O engagés dans les Illites, peu élevés. Seules les teneurs en Fe^2O^3 varient dans des limites assez larges : 2,28 p. 100 à 7,5 p. 100 pour les valeurs extrêmes.

Les rapports moléculaires assignent eux aussi à ces argiles du Morvan, une identité assez proche puisque l'intervalle de leurs variations est relativement étroit.

$$\begin{array}{lll} 1{,}70 < & SiO_2/R_2O_3 < & 2{,}18 \\ 1{,}77 < & H_2O/R_2O_3 < & 2{,}19 \\ 0{,}05 < & \text{Bases}/R_2O_3 < & 0{,}14 \end{array} \qquad R_2O_3 = Al_2O_3 + Fe_2O_3$$

3) *Essai de détermination de la composition des mélanges argileux.*

Des essais de détermination de la composition minéralogique des argiles ont été tentés à partir des analyses chimiques et des résultats des autres techniques : rayons X et mesures de surface. L'identification des minéraux a été réalisée suivant le processus exposé par S. CAILLÈRE et S. HÉNIN (1963), à l'exception de la fraction dotée de réseaux expansibles évaluée à partir des surfaces.

D'autre part, le pourcentage d'oxydes de fer, exprimé sous forme de Goethite est calculé à partir du fer libre (technique de DEB).

Les résultats globaux figurent dans le tableau 5.

Ces déterminations minéralogiques ne sont qu'approchées, mais il est possible de les vérifier en calculant les capacités d'échange et les surfaces des échantillons, à partir des données moyennes choisies pour les minéraux purs et en comparant les résultats à ceux acquis par les mesures au laboratoire. R. BLANCHET et *al.* (1965) ont récemment utilisé cette méthode avec profit. Il faut toutefois signaler que l'inconvénient majeur réside dans le fait que les caractéristiques des minéraux varient dans de larges proportions d'un type à un autre et par voie de conséquence d'un auteur à un autre.

Aussi, ces calculs n'ont-ils que la valeur de tests ; ils n'en fournissent pas moins d'assez bons recoupements, comme le montre l'exemple suivant (tabl. 6).

4. *Conclusions sur la composition du complexe d'altération.*

L'ensemble des résultats acquis pour la composition de la phase argileuse appelle de notre part les remarques suivantes :

La majeure partie des argiles du massif de la Pierre-qui-Vire (77 à 95 p. 100 de leur poids) est constituée par une association de Kaolinite faiblement cristallisée ou d'Halloysite peu hydratée, très largement dominante — puisqu'elle représente à elle seule au moins 65 p. 100 du matériel et jusqu'à 82 p. 100 — et de minéraux phylliteux : Illite + Micas (5 à 15 p. 100). La fraction restante est occupée par la Montmorillonite : 10 p. 100 dans l'échantillon 561, le plus riche, la Vermiculite (2 à 6 p. 100) et les oxydes de fer en proportion variable. Enfin, l'argile n° 941 contiendrait une part de Gibbsite : 7 p. 100.

Il est habituel (S. CAILLÈRE et S. HÉNIN, 1963) de rencontrer dans la fraction argileuse des arènes ou des sols reposant sur roches granitiques, un pourcentage

TABLEAU 5

Calcul de la composition de la phase argileuse des arènes et des sols du massif de la Pierre-qui-Vire

P. 100 des minéraux formés	Argile 441 Extraite de l'arène superficielle (100-130 cm) Forêt de Saint-Léger	Argile 141 Extraite de l'arène superficielle (100-150 cm) Monastère de la Pierre-qui-Vire	Argile 241 Extraite de l'arène (150-200 cm) Coupe en face la Chapelle du Monastère de la Pierre-qui-Vire	Argile 541 Extraite de l'arène profonde (350-400 cm) Saint-Agnan	Argile 561 Extraite du sol soliflué (15-40 cm) Saint-Agnan	Argile 581 Extraite dans une diaclase au sein de l'arène profonde (600-800 cm) Saint-Agnan	Argile 731 Extraite de l'arène superficielle (100-150 cm) Saint-Brisson	Argile 941 Extraite du sol (40-50 cm) Bois-des-Montées
Montmorillonite	9,0				10,25		7,0	7,0
Vermiculite	5,2	6,0		5,5			4,0	2,0
Illite + Micas	12,0	11,5	13,0	5,6	15,0	15,0	8,0	14,0
Kaolinite faiblement cristallisée	70,0			82,0	65,0	80,0	75,0	68,0
Halloysite peu hydratée		82,0	83,0					
Oxydes de fer	3,0		1,0	6,0	7,0	2,0	3,0	2,0
Quartz						3,0		
Gibbsite?								7,0 ?
Argile en % de terre fine < 2 mm.	11,15	6,0	2,2	5,4	13,1	2,9	1,25	18,7
Argile en % de l'échantillon total (Cailloux + Terre fine)	3,45	2,1	0,32	3,35	10,1	2,6	0,60	10,0

important de minéraux de la famille de la Kaolinite, formés surtout aux dépens des Plagioclases.

Mais ici, les conditions d'altération de ces minéraux ne se révèlent pas identiques dans tout le massif, puisqu'elles ont abouti à la formation d'Halloysite peu hydratée dans le périmètre du Monastère de la Pierre-qui-Vire.

Quant aux Illites et Micas plus ou moins altérés, Montmorillonite et Vermiculite, il faut rappeler pour rendre compte de leur présence, le schéma proposé par M. L. JACKSON et *al.* (1952), G. MILLOT (1964) et à nouveau M. L. JACKSON (1965) dans une note traitant des transformations des argiles au cours de la genèse des sols durant le Quaternaire.

$$\text{Micas} \underset{(2)}{\overset{(1)}{\rightleftharpoons}} \text{Illite} \underset{(2)}{\overset{(1)}{\rightleftharpoons}} \text{Intermédiaires} \underset{(2)}{\overset{(1)}{\rightleftharpoons}} \text{Vermiculite et Montmorillonite.}$$

TABLEAU 6

Vérification de la composition minéralogique de l'argile 731, extraite de l'arène de Saint-Brisson (Nièvre)

Minéraux argileux	% formes	C. E. C. méq./100 g minéral pur	C. E. C. méq./100 g utilisée	Surf. totale m^2/g minéral pur	Surf. totale m^2/g utilisée	Surface externe m^2/g minéral pur	Surface externe m^2/g utilisée
Montmorillonite....	7	100	7	800	56	80	5,6
Vermiculite	4	130	5,2	550	22	40	1,6
Oxyde de fer.....	3						
Illite	8	35	2,8	130	10,4	120	9,6
Kaolinite	75	12	9,0	35	26,25	35	26,25
Total	97		24,0		114,65		43,05

Résultats des examens au laboratoire

C. E. C. : 24,9 méq./100 g.

Surface totale : 83 + 26,6 = 109,6 m^2/g (26,6 m^2/g étant la valeur d'une couche monomoléculaire de la Montmorillonite).

Surface externe : 46,75 m^2/g.

Ces transformations peuvent, suivant les conditions générales du milieu, variables à la fois dans le temps et dans l'espace, s'arrêter à un stade déterminé, ou au contraire, s'accélérer en franchissant une étape. En particulier, H. E. ROBERSON et E. C. JONAS (1965) viennent de décrire des minéraux argileux dont les propriétés sont intermédiaires entre ceux des Illites et des Montmorillonites.

Dans les cas qui nous intéressent, les réactions de dégradation s'effectuant dans le sens 1 sont seules concevables. L'altération des micas aurait conduit à des Illites qui constituent la fraction majeure du matériel argileux issus des Phyllites originelles, et les transformations se poursuivant, auraient abouti au stade Vermiculite et Mont-

morillonite. Quant à la Cordiérite, très vulnérable, et dont la présence est générale dans le massif, on peut concevoir dans une première phase de dégradation, l'obtention de produits intermédiaires, évoluant par la suite vers la Vermiculite et la Montmorillonite. Mais, pour l'élaboration de ces produits terminaux, il faut imaginer des conditions de drainage modéré (S. CAILLÈRE et S. HÉNIN, 1963) ou tout au moins ralenti.

Reste à interpréter l'origine de la Gibbsite exceptionnelle dans les gisements de notre pays où sa présence probable vient toutefois d'être signalée par Jacqueline BONNAMOUR (1966) dans l'horizon A d'un sol de hêtraie du Bois-du-Roi, au sud de Château-Chinon dans le Morvan central, Selon M. L. JACKSON (1959), il semble que son apparition soit favorisée par un milieu très perméable, et caractérisé par conséquent par un excellent drainage. Les arènes du massif de la Pierre-qui-Vire remplissent cette condition essentielle.

Mais, des travaux plus poussés seront nécessaires pour confirmer cette présence possible.

Remarques sur les argiles de Saint-Agnan : n° 541 et 561. — La composition du matériel argileux prélevé à différents niveaux de la coupe apporte des renseignements précieux sur la formation de ce gisement. Nous avons vu, en effet, que l'on pouvait y distinguer aisément 3 parties depuis la base jusqu'au sommet :

1. Une zone d'arène en place, à grain fin, dont l'échantillon 541 traduit la composition du matériel argileux.

2. Une zone d'arène solifluée, se présentant avec un litage régulier ; l'argile n'a pas été déterminée ici.

3. Enfin, un sol soliflué, contenant des éléments d'un granite à gros grain, sans lien génétique par conséquent avec le substrat. Or, la composition de l'argile n° 561 est différente de celle extraite de l'arène, puisqu'elle compte une part notable de Montmorillonite et une fraction nettement moins importante de Kaolinite : 65 p. 100 au lieu de 82 p. 100. Nous retrouvons ainsi, par le truchement de l'analyse des argiles, l'origine complexe de ce gisement et l'absence de relations pédogénétiques entre le socle altéré et le sol qui le surmonte. D'ailleurs, cette argile du sol solifluée n° 561, ayant les caractéristiques granulométriques de ceux reposant sur granite à gros grain, est très voisine de l'échantillon 941, extraite d'un sol en place, également sur granite à gros grain.

Évaluation de l'amplitude de l'argilisation à partir des minéraux originels du granite. — La composition minéralogique des différents faciès des granites à 2 micas de la Pierre-qui-Vire établie dans le premier mémoire d'après le calcul de la « norme » nous a donné comme moyenne générale 32 p. 100 de Plagioclases et 6,8 p. 100 pour l'ensemble Biotite + Muscovite + Cordiérite. Le tableau 7 établi d'après ces résultats et ceux consignés dans le tableau 5, indique le pourcentage de minéraux argileux formés au cours de l'altération aux dépens de ces constituants, en supposant qu'aucun apport extérieur ne soit venu perturber la disposition des profils, ni influencer les réactions de dégradation, et que d'autre part, les Feldspaths potassiques et le Quartz demeurent intacts.

Ainsi est mise en évidence la faible amplitude des transformations des Plagioclases et de l'ensemble Micas + Cordiérite au sein des arènes. D'ailleurs l'importance des dégradations que subissent ces minéraux est tout à fait comparable, de même que les variations constatées d'un gisement à l'autre, puisque les limites extrêmes

ne diffèrent que fort peu, Lorsque l'on atteint le sol, la vitesse de l'argilisation s'accélère d'une façon particulièrement accusée, en raison de la vigueur de l'attaque des agents atmosphériques et de l'intervention des constituants de la matière organique. A la Pierre-qui-Vire, le démantèlement des micas et de la Cordiérite apparaît même dans la zone superficielle plus intense que celui qui affecte les Plagioclases, réputés pourtant très vulnérables.

Arènes et sols s'opposent donc d'une façon fondamentale, aussi bien dans leur composition granulométrique que dans l'intensité d'évolution de leurs minéraux originels. D'autre part, les transformations physico-chimiques qui ont affecté les constituants des différents granites à 2 micas du Morvan-Nord présentent certes des analogies indiscutables, mais aussi quelques différenciations et caractéristiques particulières à chaque gisement, pour lesquelles il est bien délicat d'avancer une explication valable.

TABLEAU 7

	Dans les arènes (6 éch.)			Dans les sols (2 éch.)		
	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	maximum	Moyenne
Plagioclases argilisés et transformés en Kaolinite ou Halloysite en p. 100 du Granite frais	0,26	2,75	1,6	6,56	6,8	6,7
p. 100 de Plagioclases argilisés	0,8	8,6	5,0	20,3	21	20,6
Micas + Cordiérite argilisés et transformés en Illite, Vermiculite et Montmorillonite en p. 100 du Granite frais	0,04	0,90	0,38	2,25	2,50	2,37
p. 100 des Micas + Cordiérite argilisés	0,6	13,2	5,5	33,0	36,7	34,8

L'ALTÉRATION CHIMIQUE DES GRANITES A 2 MICAS DE LA PIERRE-QUI-VIRE

I. — *Altération de minéraux isolés depuis la roche saine à l'arène*

L'examen de l'altération chimique de Feldspaths potassiques, Muscovites et Biotites isolés dans la roche saine, la roche altérée et l'arène a été réalisé pour quelques granites ; ces extractions intéressent donc le milieu considéré comme le moins altérant, le sol ayant été laissé de côté pour ce travail qu'il serait donc nécessaire de compléter, de façon à suivre l'évolution complète de ces minéraux dans l'ensemble du profil.

TABLEAU 8

Examen de l'altération chimique des feldspaths potassiques depuis la roche-mère à l'arène
Exemple du profil nº 91 sur granite à gros grain : Bois des Montées

Constituants chimiques	Feldspath K nº 911 extrait du granite frais nº 91 An. nº 70 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : janv. 1965	Feldspath K nº 921 extrait du granite altéré nº 92 An. nº 71 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : janv. 1965	Feldspath K nº 931 extrait de l'arène nº 93 (150-200 cm) An. nº 72 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : janv. 1965
H_2O^-	0,43	0,25	0,40
H_2O^+	0,44	1,30	1,40
SiO_2	65,00	62,70	62,70
Al_2O_3	19,75	21,05	20,53
Fe_2O_3	0,40	0,40	0,32
FeO	tr.	tr.	tr.
TiO_2	tr.	tr.	tr.
CaO	0,30	0,29	0,25
MgO	—	—	—
K_2O	10,78	10,20	10,75
Na_2O	3,57	3,37	3,03
Total	100,67	99,56	99,38
OH	0,52	1,59	1,67
Nombre d'ions avec pour base 32 oxygènes — Si	11,73	11,30	11,36
Al	4,20	4,46	4,37
Fe^{3+}	0,05	0,05	0,04
Ca	0,05	0,05	0,04
K	2,49	2,34	2,47
Na	1,25	1,17	1,04
z = Si + Al + Fe	15,98	15,81	15,77
x = Ca + K + Na	3,79	3,56	3,55
Mol. % Or	64,8	64,5	68,4
Ab	32,4	32,3	29
An	2,8	3,2	2,6
SiO_2/A_2lO_3	5,6	5,1	5,2
$\frac{Al_2O_3}{K_2O + Na_2O}$	1,12	1,26	1,24

TABLEAU 9

Examen de l'altération chimique des feldspaths potassiques depuis la roche-mère à l'arène
Exemple du profil n° 41 sur granite porphyroïde à Biotite de Saint-Léger

Constituants chimiques	Feldspath K n° 411 extrait du granite frais n° 41 An. n° 79 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : mars 1965	Feldspath K n° 421 extrait du granite altéré n° 42 An. n° 92 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : juil. 1965	Feldspath K n° 441 extrait de l'arène n° 44 (100-150 cm) An. n° 94 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : juil. 1965
H_2O^-	0,34	0,20	0,49
H_2O^+	1,50	1,00	3,13
SiO_2	64,10	64,10	61,95
Al_2O_3	20,00	21,90	22,45
Fe_2O_3	0,80	0,56	0,80
FeO	tr.	tr.	tr.
TiO_2	—	—	—
CaO	0,39	0,28	0,20
MgO	—	—	—
K_2O	9,60	9,70	8,25
Na_2O	3,60	3,15	2,35
Total	100,33	100,89	99,62
OH	1,77	1,16	3,64
Nombre d'ions avec pour base 32 oxygènes — Si	11,44	11,30	10,86
Al	4,20	4,55	4,60
Fe^{3+}	0,10	0,07	0,10
Ca	0,07	0,05	0,03
K	2,18	2,19	1,83
Na	1,24	1,06	0,77
z = Si + Al + Fe	15,74	15,92	15,56
x = Ca + K + Na	3,39	3,30	2,63
Mol. % — Or	61,0	65	68
Ab	34,8	31,5	29
An	4,2	3,5	3
SiO_2/Al_2O_3	5,44	5,00	4,7
$\frac{Al_2O_3}{K_2O + Na_2O}$	1,22	1,39	1,77

TABLEAU 10

Examen de l'altération chimique des feldspaths potassiques depuis la roche-mère à l'arène
Exemple du profil n° 71 sur granite à grain moyen de Saint-Brisson (Nièvre)

Constituants chimiques	Feldspath K n° 711 extrait du granite frais n° 71 An. n° 67 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : janv. 1965	Feldspath K n° 721 extrait du granite altéré n° 72 An. n° 68 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : janv. 1965	Feldspath K n° 731 extrait de l'arène n° 73 (100-150 cm) An. n° 69 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : janv. 1965
H_2O^-	0,50	0,65	1,95
H_2O^+	1,55	1,84	4,10
SiO_2	63,50	62,40	60,15
Al_2O_3	21,94	22,58	22,60
Fe_2O_3	0,50	0,50	0,70
FeO_2	tr.	tr.	tr.
TiO	tr.	tr.	tr.
CaO	0,24	0,30	0,24
MgO	—	—	—
K_2O	8,81	8,77	6,55
Na_2O	3,80	3,90	3,10
Total	100,84	100,94	99,39
OH	1,82	2,16	4,79
Nombre d'ions avec pour base 32 oxygènes — Si	11,24	11,04	10,58
Al	4,56	4,69	4,66
Fe^{3+}	0,06	0,06	0,08
Ca	0,04	0,05	0,04
K	2,00	1,97	1,45
Na	1,30	1,31	1,05
z = Si + Al + Fe	15,86	15,79	15,32
x = Ca + K + Na	3,34	3,33	2,54
Mol. % — Or	59,1	58	65,4
Ab	38,4	38,7	40,8
An	2,5	3,3	2,8
SiO_2/Al_2O_3	4,93	4,7	4,53
$\frac{K_2O + Na_2O}{Al_2O_3}$	1,38	1,42	1,8

Feldspaths potassiques.

Trois exemples ont été retenus dans l'étude de l'évolution des Feldspaths potassiques jusqu'à l'arène :

1. Profil 91 sur Granite à gros grain du Bois-des-Montées.
2. Profil 41 sur Granite porphyroïde à Biotite de la Forêt de Saint-Léger.
3. Profil 71 sur Granite à grain moyen de Saint-Brisson.

Leur extraction réalisée suivant la technique de Jacques ORLIAC (1961) a donné des minéraux relativement purs, comme il a été facile de le contrôler par un examen à la loupe binoculaire, Les résultats analytiques sont consignés dans les tableaux 8, 9 et 10.

Dans l'ensemble l'altération des Feldspaths potassiques est très peu accusée, ce qui confirme l'opinion de nombreux chercheurs et notamment D. COLLIER (1961), P. BIROT et *al.* (1963). On constate dans les trois cas une hydratation plus ou moins importante du minéral originel et un départ très faible de SiO_2 compensé par un accroissement correspondant de Al_2O_3. CaO demeure pratiquement constant dans le profil 71, alors que la moitié est éliminée dans le profil 41.

Une différence très nette s'accuse entre Na_2O et K_2O, le premier élément se révélant beaucoup plus mobile que le second.

Le comportement particulier de K_2O est très variable suivant les trois situations du massif et mérite d'être souligné. Pratiquement constant depuis la roche saine jusqu'à l'arène dans la coupe du Bois-des-Montées, une faible partie est éliminée le long du profil de Saint-Léger, tandis que dans l'arène de Saint-Brisson on note jusqu'à 25 p. 100 de pertes pour cet élément.

Ainsi la résistance quasi absolue du K_2O des feldspaths bien mise en lumière par D. COLLIER (1961) pour les granites du Massif central de la région de Clermont peut s'estomper dans une certaine mesure dans les granites de la Pierre-qui-Vire, en fonction des conditions générales du milieu, parmi lesquelles le pH des solutions et la durée de leur contact avec les minéraux jouent probablement un rôle déterminant. Cette possibilité de libération de K_2O des feldspaths est l'une des caractéristiques intéressantes de l'altération de ce massif.

Muscovites.

Muscovites et Biotites ont été isolées suivant la technique de M. BONHOMME et J. LASSERRE (1961), mise au point au Laboratoire de Géologie de Clermont-Ferrand en vue de la préparation d'échantillons pour mesure d'âge absolu des roches. Y. VIALETTE (1965), utilisant ces minéraux phylliteux vient d'ailleurs de proposer un tableau géochronologique des différents massifs du Morvan et le recoupement donné par les Biotites et Muscovites du granite de la Pierre-qui-Vire est particulièrement remarquable : 295 M. A. (1) $\pm$ 4 pour les Biotites et 296 M. A. $\pm$ 5 pour les Muscovites ; ceci assigne pour le massif, toujours d'après le dernier auteur cité (1963) un âge Stéphanien inférieur.

Les Muscovites ont été extraites dans deux profils, l'un situé au Monastère de la Pierre-qui-Vire, où le minéral est très proche de la composition théorique, et l'autre à Saint-Brisson où sa composition est intermédiaire entre celle du minéral théorique et celle d'une Phengite.

Les résultats analytiques figurent dans le tableau 11, et indiquent une résistance

(1) M. A. = million d'années

TABLEAU II

Examen de l'altération chimique des muscovites depuis la roche-mère à l'arène

Constituants chimiques	Profil n° 11 sur granite à gros grain de la Pierre-qui-Vire			Profil n° 71 sur granite à grain moyen de Saint-Brisson		
	Muscovite n° 112 extraite du granite frais n° 11 An. n° 2 554 J. ORLIAC Clermont : juin 1964	Muscovite n° 122 extraite du granite altéré n° 12 An. n° 34 P. AUBRY J. DEJOU Dijon : 1964	Muscovite n° 132 extraite de l'arène n° 13 (100-150 cm) An. n° 86 C. CHAUMONT Châteauroux : avril 1965	Muscovite n° 712 extraite du granite frais n° 71 An. n° 75 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : janv.-fév. 1965	Muscovite n° 722 extraite du granite altéré n° 72 An. n° 89 C. CHAUMONT Châteauroux : mai 1965	Muscovite n° 732 extraite de l'arène n° 73 (100-150 cm) An. n° 91 C. CHAUMONT Châteauroux : mai 1965
H_2O^-	0,20	1,00	0,65	0,60	0,70	0,70
H_2O^+	4,30	5,30	6,50	6,30	5,10	5,60
SiO_2	43,50	44,50	46,70	46,00	48,58	46,90
Al_2O_3	34,35	33,48	32,80	29,21	31,10	31,70
Fe_2O_3	1,77	3,65	4,03	5,35	4,08	4,08
FeO	1,80	0,45	0,11	2,10	1,08	1,80
TiO_2	0,05	0,41	0,60	0,45	0,40	0,40
P_2O_5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MnO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CaO	1,40	0,33	0,11	0,20	0,14	0,15
MgO	2,90	0,98	0,95	1,35	1,00	1,10
K_2O	8,95	8,86	7,55	7,50	8,00	7,90
Na_2O	1,20	1,34	0,94	1,50	1,30	1,18
Total	100,42	100,30	100,93	100,56	101,48	101,51

TABLEAU II (suite)

Constituants chimiques	Profil n° 11 sur granite à gros grain de la Pierre-qui Vire			Profil n° 71 sur granite à grain moyen de Saint-Brisson		
	Muscovite n° 112 extraite du granite frais n° 11 An. n° 2 554 J. ORLIAC Clermont : juin 1964	Muscovite n° 122 extraite du granite altéré n° 12 An. n° 34 J. AUBRY . DEJOU Dijon : janvier 1964	Muscovite n° 132 extraite de l'arène n° 13 (100-150 cm) An. n° 86 C. CHAUMONT Châteauroux : avril 1965	Muscovite n° 712 extraite du granite frais n° 71 An. n° 75 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : janv.-fév. 1965	Muscovite n° 722 extraite du granite altéré n° 72 An. n° 89 C. CHAUMONT Châteauroux : mai 1965	Muscovite n° 732 extraite de l'arène n° 73 (100-150 cm) An. n° 91 C. CHAUMONT Châteauroux : mai 1965
Nombre d'ions avec pour base 24(OH, F)						
(OH)	3,77	4,72	5,63	5,57	4,44	4,90
Si	5,87	5,95	6,04	6,08	6,35	6,15
Al	2,13 } 8,00	2,05 } 8,00	1,96 } 8,00	1,92 } 8,00	1,65 } 8,00	1,85 } 8,00
Al	3,32	3,21	3,04	2,62	3,13	3,03
Fe^{3+}	0,18	0,37	0,38	0,582	0,40	0,40
Ti	tr	0,04	0,05	0,05	0,03	0,03
Fe^{2+}	0,20 } 4,28	0,05 } 3,87	0,01 } 3,66	0,23 } 3,702	0,11 } 3,86	0,19 } 3,86
Mn	—	—	—	—	—	—
Mg	0,58	0,20	0,18	0,27	0,19	0,21
Ca	0,20	0,05	0,02	0,03	0,02	0,02
K	1,53 } 2,04	1,51 } 1,90	1,24 } 1,49	1,26 } 1,67	1,33 } 1,66	1,32 } 1,63
Na	0,31	0,34	0,23	0,38	0,31	0,29
Charges en couche tétraédrique	— 2,13	— 2,05	— 1,96	— 1,92	— 1,65	— 1,85
Charges en couche octaédrique.	+ 0,09	+ 0,15	+ 0,47	+ 0,25	— 0,01	+ 0,22
Charges des espaces interfoliaires	+ 2,04	+ 1,90	+ 1,49	+ 1,67	+ 1,66	+ 1,63
Al octaédrique (%)	60	61	60,4	57,7	66	62

remarquable de ces minéraux aux agents de l'altération, du moins jusqu'au stade de l'arène, ce qui confirme une donnée classique acquise depuis déjà longtemps. Cependant, tout comme pour les Feldspaths potassiques, des nuances apparaissent dans les deux situations envisagées. Les Muscovites de la Pierre-qui-Vire marquent un début d'évolution, certes très faible, mais apparent, par rapport à celles de Saint-Brisson qui sont demeurées intactes, ce que traduit nettement le déplacement du point figuratif de leur composition chimique dans le triangle de concentration SiO_2 — Al_2O_3 — MgO (schéma 10).

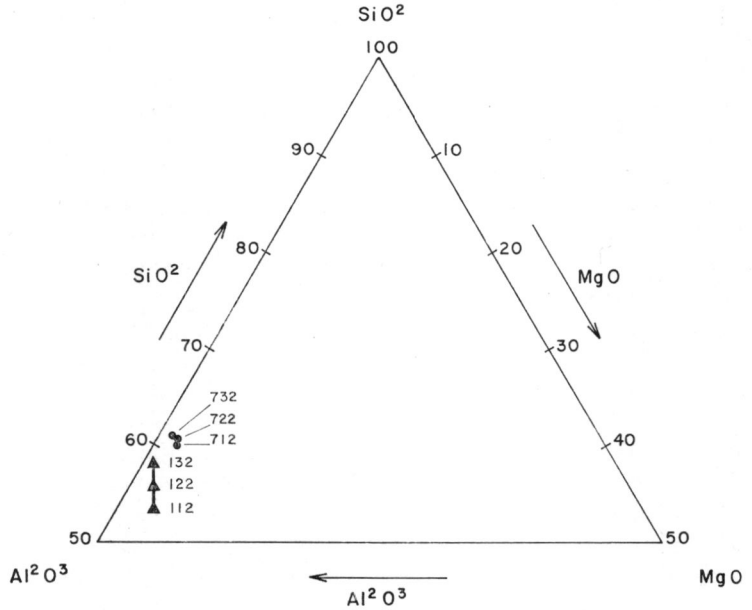


FIG. 10. — *Muscovites de la Pierre-qui-Vire*
Représentation graphique de leur altération chimique depuis la roche saine à l'arène

Parmi les modifications chimiques d'intensité réduite enregistrées pour les échantillons de la Pierre-qui-Vire, on peut noter :

— *une hydratation des minéraux*, qui ne se manifeste pas à Saint-Brisson et qui est sans doute la cause de l'invulnérabilité des Muscovites dans ce dernier profil ;

— *une oxydation très nette du FeO*, à peine soulignée à Saint-Brisson où l'on enregistre par contre une élimination d'une partie de Fe_2O_3 total ;

— *l'élimination quasi totale de CaO* ;

— *la perte des 2/3 de MgO*, peu marquée à Saint-Brisson ;

— *l'élimination d'une part de K^2O et Na^2O*, qui ne se manifeste pas non plus à Saint-Brisson.

La perte de charges des cations intercouches due au départ progressif de CaO, K_2O et Na_2O, est compensée par un gain en couche octaédrique, au cours de l'altération. Dans le cas de Saint-Brisson, la charge des cations intercouches est au contraire remarquablement constante.

Ainsi, le comportement des différentes Muscovites de la Pierre-qui-Vire n'apparaît pas identique dans toutes les situations.

Biotites.

Tout comme pour les Muscovites, l'évolution des Biotites du massif de la Pierre-qui-Vire a été suivie jusqu'à l'arène dans deux profils, l'un localisé dans la Forêt de Saint-Léger et l'autre dans le Bois des Montées. Mais avant de discuter les résultats analytiques du tableau 12, trois remarques doivent être préalablement proposées :

1. L'extraction des Biotites contenues dans les arènes est délicate, si bien que la pureté des échantillons n'égale pas celle des Feldspaths potassiques et des Muscovites.

2. L'analyse de ces minéraux est aussi plus complexe, de sorte que, malgré les précautions prises, des imprécisions sont toujours possibles dans l'expression des résultats.

3. Les échantillons analysés surtout ceux des arènes, sont un mélange de Biotites saines, fraîches, d'un noir brillant, et de Biotites plus ou moins mordorées, donc plus ou moins altérées — à l'exclusion de tout matériel susceptible d'avoir été argilisé — de sorte que les données analytiques n'indiquent qu'une moyenne de l'évolution chimique de ces minéraux. Celle-ci aurait sans aucun doute apparu de façon plus nette s'il avait été possible de séparer les Biotites mordorées de celles qui ne le sont pas, mais, eu égard aux difficultés du problème, nous avons renoncé à mettre en œuvre cette séparation.

Ces réserves nécessaires ayant été formulées, les résultats trouvés pour les Biotites expriment néanmoins, tout comme pour les Muscovites et suivant des analogies frappantes, des différences dans le comportement de ces minéraux dans les deux profils analysés. Les Biotites de la Pierre-qui-Vire, sont au stade de l'arène, légèrement plus altérées que celles du Bois des Montées, pratiquement intactes, comme le précise d'ailleurs la représentation graphique de leur évolution dans le diagramme de E. W. HEINRICH (1946). Les principales modifications chimiques, en accord avec les résultats de G. F. WALKER (1949), sont les suivantes depuis le granite frais à l'arène :

— *hydratation progressive des Biotites de Saint-Léger,* qui se ne manifeste pas au Bois des Montées, ce qui explique leur immunité ;

— *oxydation continue du FeO en* Fe_2O_3, avec élimination d'une part du Fe_2O_3 total, alors qu'au Bois des Montées ce processus est atténué, et que la perte du Fe_2O_3 est nulle ;

— *perte du* TiO_2, qui s'exsude dans les clivages des minéraux ou forme de l'ilménite, alors que la teneur en cet élément demeure identique au Bois des Montées ;

— *élimination du CaO ;*

— *remarquable résistance de MgO,* alors que G. F. WALKER (1949) signale son élimination importante dans les échantillons de sols du district d'Aberdeen en Écosse, ce qui laisse supposer un départ plus accusé dans ce milieu que dans la zone d'altération ;

— *perte d'un certain pourcentage de* K_2O *et* Na_2O, pratiquement nulle au Bois des Montées ;

— *faibles accroissements de* SiO_2 *et* Al_2O_3, pour compenser l'ensemble des pertes des autres éléments.

Les remarques formulées pour les Muscovites en ce qui concerne les charges sont valables pour les Biotites de Saint-Léger, où l'on enregistre une perte sensible en positions intercouches compensée par un gain en couche octaédrique, alors que peu de modifications sont relevées dans les échantillons de Saint-Brisson.

TABLEAU 12

Examen de l'altération chimique des biotites depuis la roche-mère à l'arène

Constituants chimiques	Profil n° 41 sur granite porphyroïde à biotite de Saint-Léger			Profil n° 91 sur granite à 2 micas à gros grain du Bois des Montées		
	Biotite n° 412 extraite du granite frais n° 41 An. n° 77 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : février 1965	Biotite n° 422 extraite du granite altéré An. n° 95 C. CHAUMONT Châteauroux : juillet 1965	Biotite n° 442 extraite de l'arène n° 44 (100-150 cm) An. n° 96 C. CHAUMONT Châteauroux : juillet 1965	Biotite n° 913 Extraite du granite frais n° 91 An. n° 99 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : juillet 1965	Biotite n° 923 Extraite du granite altéré n° 92 An. n° 83 C. CHAUMONT Châteauroux : avril 1965	Biotite n° 933 Extraite de l'arène n° 93 (150-200 cm) An. n° 85 C. CHAUMONT Châteauroux : avril 1965
H_2O^-	1,45	1,11	2,00	0,55	0,64	0,90
H_2O^+	3,80	5,50	5,50	4,50	3,90	3,30
SiO_2	33,26	34,74	34,10	35,70	37,80	35,75
Al_2O_3	19,78	21,57	23,35	21,20	22,83	23,03
Fe_2O_3	7,70	9,80	10,10	5,40	6,63	6,68
FeO	14,10	10,85	10,50	15,30	13,25	13,68
TiO_2	4,00	3,30	2,62	2,50	2,33	2,50
P_2O_5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MnO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CaO	0,40	0,14	0,16	0,35	0,11	0,11
MgO	7,00	6,70	6,75	3,10	2,60	3,24
K_2O	7,42	5,25	5,30	7,35	7,00	7,30
Na_2O	0,53	0,38	0,20	0,80	0,80	0,70
Total	99,44	99,34	100,59	96,75	97,89	97,19

TABLEAU 12 (suite)

	Profil n° 41 sur granite porphyroïde à biotite de Saint-Léger			Profil n° 91 sur granite à 2 micas à gros grain du Bois des Montées		
	Biotite n° 412 extraite du granite frais n° 41 An. n° 77 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : fév. 1965	Biotite n° 422 extraite du granite altéré An. n° 95 C. CHAUMONT Châteauroux : juil. 1965	Biotite n° 442 extraite de l'arène n° 44 (100-150 cm) An. n° 96 C. CHAUMONT Chateauroux : juil. 1965	Biotite n° 913 extraite du granite frais n° 91 An. n° 99 C. CHAUMONT J. DEJOU Châteauroux : juillet 1965	Biotie n° 923 extraite du granite altéré n° 92 An. n° 83 C. CHAUMONT Châteauroux : avril 1965	Biotite n° 933 extraite de l'arène n° 93 (150-200 cm) An. n° 85 C. CHAUMONT Châteauroux : avril 1965
Nombre d'ions avec pour base 24(OH, F)						
Si	5,09	5,07	4,94	5,47	5,67	5,50
Al	2,91 } 8,00	2,93 } 8,00	3,06 } 8,00	2,53 } 8,00	2,33 } 8,00	2,50 } 8,00
Al	0,65	0,76	0,91	1,28	1,69	1,66
Fe^{3+}	0,88	1,06	1,09	0,60	0,74	0,77
Ti	0,45	0,35	0,28	0,28	0,26	0,28
Fe^{2+}	1,82 } 5,40	1,31 } 4,94	1,26 } 5,01	1,95 } 4,82	1,65 } 4,92	1,75 } 5,20
Mn	—	—	—	—	—	—
Mg	1,60	1,46	1,47	0,71	0,58	0,74
Ca	0,06	0,01	0,02	0,05	0,05	0,05
K	1,45 } 1,66	0,96 } 1,07	0,98 } 1,05	1,43 } 1,71	1,33 } 1,60	1,42 } 1,67
Na	0,15	0,10	0,05	0,23	0,22	0,20
(OH)	3,87	5,34	5,34	4,6	3,9	3,4
Charges en couche tétraédrique	— 2,91	— 2,93	— 3,06	— 2,53	— 2,33	— 2,50
Charges en couche octaédrique	+ 1,25	+ 1,86	+ 2,01	+ 0,82	+ 0,73	+ 0,83
Charges des espaces interfoliaires	+ 1,66	+ 1,07	+ 1,05	+ 1,71	+ 1,60	+ 1,67
Al octaédrique (%)	18	20,5	23	33	42	40

Ainsi, ces quelques exemples d'altération de Feldspaths potassiques, Muscovites et Biotites de la Pierre-qui-Vire dénotent jusqu'au stade de la transformation des granites en arènes une évolution générale peu accusée, ce qui confirme ainsi les très faibles mesures de l'argilisation à ce niveau même. Ils ont aussi permis de souligner l'incidence majeure de l'hydratation dans la phase initiale des processus d'altération, et de marquer les nuances des phénomènes d'une situation à l'autre du massif. Mais il est certain que cette amorce de désagrégation doit, tout au moins pour les Biotites, s'accélérer de façon sensible dans les sols, en accord avec les données acquises sur l'amplitude de l'argilisation.

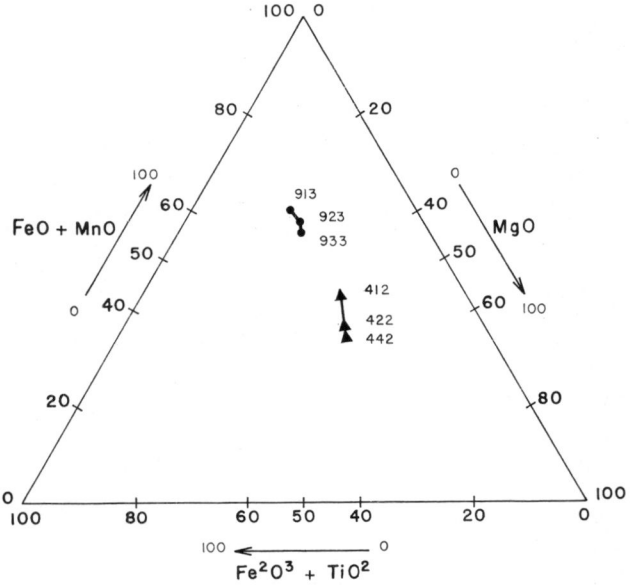


FIG. 11. — *Biotites de la Pierre-qui-Vire.*
Représentation graphique de leur évolution chimique depuis la roche saine à l'arène

II — *L'altération chimique globale depuis la roche-mère jusqu'au sol qui en dérive*

L'examen de l'altération chimique globale des granites à 2 micas de la Pierre-qui-Vire jusqu'aux sols qui en dérivent, permettant en même temps l'établissement de liaisons génétiques entre le substrat et l'ensemble du profil, est sans conteste l'un des problèmes les plus délicats et les plus complexes de cette étude. Il a été abordé grâce à la technique suivante :

1° Détermination de la composition chimique globale de la roche fraîche, de la roche altérée, de l'arène et du sol.

2° Calcul de la composition minéralogique des différents horizons par rapport au granite de référence, en supposant le quartz le minéral le plus résistant.

Trois profils, figurant dans les schémas 2, 3, 5 ont été retenus ; ce sont respectivement :

1° Le profil de la Forêt de Saint-Léger sur granite porphyroïde à Biotite : Éch. 41 à 45 (Tabl. 13 et 14)

2° Le profil du Monastère de la Pierre-qui-Vire sur granite à 2 micas à gros grain : Éch. 22 à 25 tabl. 15 et 16).

3° Le profil de Saint-Brisson sur granite à 2 micas à grain moyen : Éch. 71 à 74 tabl. 17 et 18).

Critiques de cette technique d'étude

Dans la pratique, la technique qui vient d'être exposée se heurte à de nombreuses difficultés d'ordres pétrographique et analytique qui doivent être présentées, avant toute discussion, de façon à connaître les limites de ses possibilités.

TABLEAU 13

I) *Granite porphyroïde de la forêt de Saint-Léger (Yonne) sans muscovite*
Feuille Quarré-les-Tombes 1/50 000 : 265,3 × 730,4

a) Analyses chimiques des différents horizons du profil (Totalité des fractions minérales)

Constituants chimiques	Échantillon nº 41 Granite frais prélevé sur une boule à 80 m de la carrière An. nº 13 Mme M. JACQUIN J. DEJOU Dijon : juillet 1963	Échantillon nº 42 Granite très altéré à la base de la carrière An. nº 14 Mme M. JACQUIN J. DEJOU Dijon : juillet 1963	Échantillon nº 43 Arène profonde (3 m de la surface) An. nº 15 Mme M. JACQUIN J. DEJOU Dijon : juillet 1963	Échantillon nº 44 Arène superficielle (1 m de la surface) An. nº 16 Mme M. JACQUIN J. DEJOU Dijon : juillet 1963	Échantillon nº 45 Sol sur arène (8-40 cm) An. nº 17 Mme M. JACQUIN J. DEJOU Dijon : juillet 1963
H_2O^-	0,19	0,40	0,60	0,56	0,80
H_2O^+	0,59	1,97	4,15	3,83	3,86
SiO_2	71,32	67,75	64,07	66,15	67,45
Al_2O_3	15,34	17,02	16,28	18,37	16,54
Fe_2O_3	0,56	1,29	1,92	1,98	1,48
FeO	1,29	1,11	0,80	0,76	0,76
TiO	0,27	0,37	0,30	0,34	0,34
P_2O_5	0,10	0,10	0,06	0,07	0,09
MnO	0,03	0,04	0,01	0,04	0,06
CaO	0,83	0,71	0,25	0,22	0,20
MgO	0,45	0,45	0,25	0,37	0,37
K_2O	5,05	5,10	4,93	5,23	5,08
Na_2O	3,60	3,25	2,19	1,92	2,10
Total	99,62	99,56	99,61	99,84	99,13

Les résultats de l'échantillon nº 45 ont été recalculés, compte tenu de la présence de 3,04 p. 100 de matières organiques.

Calcul des rapports moléculaires

Nº échantillons	SiO_2/Al_2O_3	SiO_2/Fe_2O_3	SiO_2/FeO	SiO_2/CaO	SiO_2/MgO	SiO_2/K_2O	SiO_2/Na_2O	SiO_2/Bases	SiO_2/Bases — K^2O
41. Granite frais	7,92	339	66	80,2	106	22,1	20,5	8,6	14,1
42. Granite altéré	6,76	141	73,3	89,6	100,8	20,8	21,5	8,6	14,8
43. Arène profonde	6,70	89	97	243	170	20,4	30,2	10,8	23,2
44. Arène superficielle	6,12	89,6	105	275	118	19,8	35,5	11,4	25,5
45. Sol	6,94	120	107	312	120	20,8	33,2	11,2	24,1

TABLEAU 14

b) Composition minéralogique du granite frais, de l'arène superficielle et du sol en utilisant les formules structurales des minéraux séparés et analysés

Minéraux	Granite frais nº 41	Arène superficielle nº 44	Sol (8-40 cm) nº 45
Apatite	0,23	0,17	0,20
Minéraux opaques	0,20	1,27	1,39
Biotite	5,87	5,40	5,40
Feldspaths K	26,65	27,46	27,70
Albite	30,40	16,24	17,71
Anorthite	3,53	0,70	0,50
Argile $< 2\ \mu$ (domin. Kaolinite)	—	3,45	7,05
Matériel 2-5 μ	—	0,50	2,40
Al_2O_3 restant	1,63	6,00	1,90
Quartz	30,50	33,80	32,00
H_2O totale	0,78	4,40	4,66
Total	99,77	99,39	100,61

c) Composition minéralogique du sol par rapport à 100 du granite de référence, en supposant le quartz le minéral le plus résistant

Minéraux	Granite frais nº 41	Sol nº 45	Pourcentage des minéraux essentiels altérés à partir du granite
Apatite	0,25	0,20	
Minéraux opaques	0,20	1,30	
Biotite	5,87	5,15	12,2
Feldspaths K	26,65	26,40	0,7
Albite	30,40	16,90	44
Argile $< 2\ \mu$ (Kaolinite)	—	6,70	
Anorthite	3,53	0,48	85
Matériel 2-5 μ	—	2,30	
Al_2O_3 restant	1,63	1,80	
Quartz	30,50	30,50	
H_2O totale	0,78	4,45	
Total	99,77	96,18	

Différence enregistrée depuis le granite au sol : 3,6 p. 100.

TABLEAU 15

II — *Granite à 2 micas à gros grain de la Pierre-qui-Vire. Coupe en face de la Chapelle du Monastère*

Feuille Quarré-les-Tombes { Roche fraîche, le long du Trinquelin : 730,8 × 262,9
Produits d'altération : 730,7 × 263,2

a) Analyses chimiques des différents horizons du Profil (totalité des fractions minérales)

Constituants chimiques	Échantillon n° 22 Granite frais le long du Trinquelin An. n° 46 P. AUBRY J. DEJOU Dijon : avril 1964	Échantillon n° 23 Granite altéré en face de la chapelle An. n° 47 P. AUBRY J. DEJOU Dijon : avril 1964	Échantillon n° 24 Arène grossière 2-3 m de la surface An. n° 48 P. AUBRY J. DEJOU Dijon : avril 1964	Échantillon n° 25 Sol (5-15 cm) sur arène en face de la chapelle An. n° 49 P. AUBRY J. DEJOU Dijon : avril 1964
H_2O^-	0,08	0,13	0,35	1,04
H_2O^+	0,53	0,80	1,17	1,19
SiO_2	73,25	74,30	71,94	72,68
Al_2O_3	14,58	13,70	15,00	15,24
Fe_2O_3	1,20	1,22	1,46	1,36
FeO	1,22	0,93	0,90	0,94
TiO_2	0,20	0,18	0,22	0,23
P_2O_5	0,11	0,07	0,09	0,09
MnO	0,04	0,03	0,04	0,04
CaO	0,60	0,50	0,43	0,40
MgO	0,20	0,19	0,15	0,18
K_2O	4,31	4,68	4,30	4,14
Na_2O	3,20	2,90	2,71	1,84
Total	99,52	99,63	98,76	99,37

Les résultats des échantillons 24 et 25 ont été recalculés, compte tenu de la présence de 0,50 p. 100 et 4,60 p. 100 de matières organiques.

Calcul des rapports moléculaires

N° échantillons	SiO_2/Al_2O_3	SiO_2/Fe_2O_3	SiO_2/FeO	SiO_2/CaO	SiO_2/MgO	SiO_2/K_2O	SiO_2/Na_2O	SiO_2/Bases totales	SiO_2/Bases — K^2O
22. Granite frais	8,5	163	70	116	244	26,5	23,7	10,8	18,2
23. Granite altéré	9,2	165	92	137	247	24,7	26,3	11,1	20,3
24. Arène	8,2	133	92	160	299	26,3	27,5	12,0	20,8
25. Sol	8,1	142	90	173	269	27,5	40,3	14,1	21,8

TABLEAU 16

b) Composition minéralogique des différents horizons du profil en utilisant les formules des minéraux analysés

Minéraux	Granite frais n° 22	Granite altéré n° 23	Arène n° 24	Sol n° 25
Apatite	0,27	0,20	0,20	0,21
Minéraux opaques	1,72	1,65	1,90	1,93
Biotite	2,26	2,72	2,10	2,20
Muscovite	2,20	3,90	3,90	2,60
Feldspaths K	23,40	24,95	22,70	23,25
Albite	26,70	24,10	22,80	15,70
Anorthite	2,10	2,10	1,66	1,45
Argile $< 2\ \mu$ (Kaolinite)	—	—	0,35	8,00
Matériel 2-5 μ	—	—	0,20	2,50
Al_2O_3 restant	2,75	1,40	3,15	1,20
Quartz	37,50	38,58	38,60	39,75
H_2O totale	0,62	0,93	1,52	2,23
Total	99,52	100,48	99,08	101,02

c) Composition des différents horizons de la Pierre-qui-Vire par rapport à 100 du Granite de référence en supposant le quartz le minéral le plus résistant

Minéraux	Granite frais n° 22	Granite altéré n° 23	Arène n° 24	Sol n° 25	Pourcentage des minéraux essentiels altérés depuis le granite jusqu'au sol
Apatite	0,27	0,20	0,20	0,21	
Minéraux opaques	1,72	1,60	1,85	1,80	
Biotite	2,26	2,85	2,05	2,07	8,4
Muscovite	2,20	3,80	3,80	2,45	—
Feldspaths K	23,40	24,30	22,05	21,92	6,3
Albite	26,70	23,50	22,15	14,80	44
Anorthite	2,10	2,05	1,60	1,37	35
Argile $< 2\ \mu$ (Kaolinite)	—	—	0,35	7,55	
Matériel 2-5 μ	—	—	0,20	2,35	
Al_2O_3 restant	2,75	1,40	3,06	1,10	
Quartz	37,50	37,50	37,50	37,50	
H_2O totale	0,62	0,90	1,50	2,10	
Total	99,52	97,90	96,31	95,22	

Différences enregistrées depuis la roche fraîche { au granite altéré ..... 1,6 p. 100 ; à l'arène ..... 3,2 p. 100 ; au sol ..... 4,3 p. 100

TABLEAU 17

III — *Granite à 2 micas à grain moyen de Saint-Brisson*

Prélèvement sur la route Montsauche-Saulieu N 77 *bis* tout près du croisement D 20 (feuille Saulieu : 731,4 × 252,2)

a) Analyses chimiques des différents horizons du Profil (totalité des fractions minérales)

Constituants chimiques	Échantillon nº 71 Granite frais An. nº 29 P. AUBRY J. DEJOU Dijon : janvier 1964	Échantillon nº 72 Granite altéré An. nº 30 P. AUBRY J. DEJOU Dijon : janvier 1964	Échantillon nº 73 Arène (100-150 cm) An. nº 31 P. AUBRY J. DEJOU Dijon : février 1964	Échantillon nº 74 Sol (20-30 cm) soliflué mais contenant les mêmes matériaux originels An. nº 32 P. AUBRY J. DEJOU Dijon : février 1964
H_2O^-	0,15	0,18	0,35	0,72
H_2O^+	0,58	1,35	2,24	1,10
SiO_2	73,80	74,60	72,40	72,69
Al_2O_3	15,32	14,71	17,10	16,18
Fe_2O_3	0,71	0,75	0,76	1,23
FeO	0,77	0,32	0,47	0,54
TiO_2	0,10	0,11	0,13	0,23
P_2O_5	0,10	0,06	0,10	0,10
MnO	0,06	0,03	0,02	0,04
CaO	0,47	0,26	0,17	0,28
MgO	0,16	0,10	0,05	0,15
K_2O	4,34	4,38	4,22	4,44
Na_2O	3,70	2,83	1,92	1,53
Total	100,26	99,68	99,93	100,24

Les résultats de l'échantillon 74 ont été recalculés, compte tenu de la présence de 3,2 p. 100 de matières organiques.

Calcul des rapports moléculaires

Nº échantillons	SiO_2/Al_2O_3	SiO_2/Fe_2O_3	SiO_2/FeO	SiO_2/CaO	SiO_2/MgO	SiO_2/K_2O	SiO_2/Na_2O	SiO_2/Bases totales	SiO_2/Bases — K^2O
71. Granite frais	8,2	295	107	144	307	26,7	20,6	10,4	17,0
72. Granite altéré	8,6	276	276	276	500	26,7	27,3	12,5	14,0
73. Arène	7,2	241	186	402	960	26,8	39	14,0	34,3
74. Sol	7,7	175	164	245	327	26,1	50	15,3	37

TABLEAU 18

b) Composition minéralogique des différents horizons du profil en utilisant les formules des minéraux analysés

Minéraux	Granite frais n° 71	Granite altéré n° 72	Sol n° 74
Apatite	0,24	0,15	0,24
Minéraux opaques	0,60	0,52	0,90
Biotite	3,55	2,90	3,90
Muscovite	2,80	2,40	3,30
Feldspaths K	22,45	23,20	22,00
Albite	30,65	23,85	12,60
Anorthite	1,75	0,90	0,80
Argile $< 2\ \mu$ (Kaolinite)	—	—	11,40
Matériel 2-5 μ	—	—	3,00
Al_2O_3 restant	2,45	3,20	0,40
Quartz	36,00	41,40	40,30
H_2O totale	0,73	1,53	1,82
Total	101,22	100,05	100,66

c) Composition minéralogique du sol par rapport à 100 du granite de référence en supposant le quartz le minéral plus résistant

Minéraux	Granite frais n° 71	Sol n° 74	Pourcentage des minéraux essentiels altérés à partir du granite
Apatite	0,24	0,24	
Minéraux opaques	0,60	0,80	
Biotite	3,55	3,50	1,4
Muscovite	2,80	2,95	—
Feldspaths K	22,45	19,80	11,7 (Pertes importantes de K_2O déjà signalées)
Albite	30,65	11,35	63
Anorthite	1,75	0,75	57
Argile $< 2\ \mu$ (Kaolinite)	—	10,26	
Matériel 2-5 μ	—	2,70	
Al_2O_3 restant	2,45	0,36	
Quartz	36,00	36,00	
H_2O totale	0,73	1,65	
Total	101,22	90,36	

Différence enregistrée depuis le granite au sol 10,8 p. 100.

Si l'on prend 38,5 p. 100 de Quartz comme valeur moyenne de référence, cette différence tombe à 4,5 p. 100.

Tout d'abord, elle suppose que les différents échantillons analysés — de la roche-mère jusqu'au sol représentant la phase ultime des processus d'altération — sont tous disposés suivant le même profil, homogène dans son ensemble, n'ayant reçu aucun apport allochtone, et dans lequel les zones d'altération dérivent d'une façon indiscutable du substrat sous-jacent. Or, il n'a jamais été possible de remplir dans sa plénitude cette condition fondamentale, puisque le granite frais a toujours été recueilli en dehors de sa zone d'altération ; par exemple, dans le cas du profil de Saint-Léger sur granite porphyroïde à biotite nous servant de terme de comparaison, nous avons été forcé de prélever la roche fraîche sur une boule située à plus de 50 m de la carrière. A la Pierre-qui-Vire, la distance était beaucoup plus importante encore. Ces échantillons représentent-ils exactement le granite frais sous-jacent ?

Par ailleurs, l'expérience montre qne même dans un massif réputé homogène comme l'attestent les analyses, il existe toujours des hétérogénéités locales qui se traduisent par des variations parfois relativement accusées dans les compositions chimiques et minéralogiques. Par exemple, le calcul de la teneur en Quartz du granite frais de Saint-Brisson n° 71 donne 36 p. 100 alors que celui de l'échantillon altéré n° 72 indique 41,4 p. 100 pour ce même minéral. Il est évident qu'il s'agit en l'occurrence d'une variation locale assez importante, mais dont l'incidence est surtout très marquée dans l'établissement d'un bilan d'altération. Si l'on prend comme il conviendrait naturellement la teneur inférieure comme référence, en raison de la fraîcheur de l'échantillon, on aboutit pour le sol à un total de pertes ou de transformations minéralogiques égal à 10 p. 100 de la roche fraîche, alors qu'en choisissant 41,4 p. 100 de Quartz, ces mêmes pertes ou transformations s'avèrent nulles. Il est bien difficile de trancher en la circonstance et le choix d'une valeur moyenne cerne peut-être de plus près la vérité.

Indépendamment de ces difficultés inhérentes au matériau lui-même, et valables aussi bien pour la roche fraîche que pour ses zones d'altération, dont on peut contester toujours l'homogénéité supposée réalisée, d'autres surgissent dans le domaine analytique, rendant l'étude des relations sol-substrat extrêmement délicate.

En effet, tous le calculs qui vont suivre, basés sur la teneur en Quartz de la roche fraîche originelle, supposent qu'il s'agit du minéral le plus résistant de l'ensemble de la paragenèse granitique. Or, l'étude de l'altération chimique des feldspaths potassiques pourtant réputés à juste titre résistants (tabl. 8 à 10) a montré une diminution continue du rapport SiO_2/Al_2O_3 jusqu'au stade de l'arène. Al_2O_3 demeurant pratiquement constant, il faut admettre une possibilité, certes très faible, mais qui n'en est pas moins réelle, de départ de SiO_2 — et qui est sans doute plus accusée dans l'altération des Plagioclases en argile — de sorte qu'en définitive, la résistance de ce minéral n'étant pas parfaite, l'établissement des bilans est entaché d'erreurs dont les répercussions peuvent être assez importantes. Certes l'hypothèque serait aisément levée si l'on pouvait doser le Quartz libre dans les divers échantillons. Mais nous avons vu les aléas de la technique de J. P. JANSSENS (1952) qui ne nous a pas donné satisfaction. Quoiqu'il en soit, et nous partageons l'opinion de F. LELONG (1964), le Quartz demeure le « meilleur invariant » dont on dispose pour apprécier le comportement différentiel des éléments au cours de l'altération.

D'autre part, d'autres sources d'erreurs sont imputables aux analyses elles-mêmes ; la détermination de la composition chimique des minéraux est très délicate dans le cas des Biotites, dont la pureté spécifique est par ailleurs difficile à obtenir.

Il est également impossible de calculer l'ensemble de la paragenèse Biotite-Muscovite-Cordiérite qui caractérise les granites à 2 micas de la Pierre-qui-Vire, car on ignore comment se répartit MgO dans les trois constituants. Aussi n'avons-nous pas tenu compte de la Cordiérite dans la présentation des résultats, tout en reconnaissant qu'elle participe, en raison de sa vulnérabilité, à la formation du matériel argileux dans les arènes et les sols. D'après J. LAMEYRE (1965) qui a effectué des déterminations à l'aide de la platine intégratrice, sa teneur serait de l'ordre de 2 à 3 % dans le granite frais.

Une autre objection, peut-être l'une des plus graves formulée à l'encontre de cette étude, est la méconnaissance de l'état chimique des minéraux microdivisés dans le sol, et assimilés à ceux déterminés au sein des arènes, et l'ignorance des stades intermédiaires de la dégradation si fondamentale des Plagioclases dont nous ne connaissons que la phase ultime, c'est-à-dire le matériel argileux. Et il faut encore ajouter que la proportion de ce matériel néosynthétisé obtenue à partir de l'analyse granulométrique peut ne pas être rigoureusement exact, eu égard à l'imprécision de la détermination des éléments cailloux + graviers qui en fournit en définitive la teneur.

Aussi, eu égard à toutes ces imprécisions qui ajoutent leurs effets, les calculs qui vont suivre n'ont-ils que la valeur de tests et ne peuvent-ils fournir tout au plus qu'un ordre de grandeur des phénomènes en jeu.

Discussion des résultats analytiques.

Les résultats analytiques appellent de notre part un certain nombre de remarques :

Analyses chimiques.

Qu'il s'agisse du granite porphyroïde à Biotite de Saint-Léger ou des granites à 2 micas de la Pierre-qui-Vire et de Saint-Brisson, les analyses des différents niveaux des profils marquent des analogies indiscutables, ce qui atteste des liaisons génétiques étroites entre la roche-mère et les produits d'altération qui en sont issus. De plus, les faibles variations enregistrées dans les pourcentages pondéraux des divers constituants, annoncent une altération chimique globale très ménagée, sous nos climats tempérés, *ou plus exactement sous la résultante des différentes actions climatiques qui se sont succédées depuis le début de l'arénisation.* Cette constatation ne fait que confirmer les observations de D. COLLIER (1951 et 1961) sur les granites du Massif central, et les nôtres sur les granites porphyroïdes du Morvan-Nord et sur les anatexites à Cordiérite (1959). Il semble donc que le phénomène soit général sur l'ensemble des granites et des migmatites.

Il faut surtout noter, au cours des processus d'altération, une augmentation progressive de la teneur en H_2O depuis la roche-mère jusqu'au sol — traduction des phénomènes d'hydratation qui président à tout mécanisme de dégradation, comme nous l'avons mentionné à propos des Phyllites — de faibles variations dans les taux de SiO_2 et Al_2O_3, une oxydation plus ou moins intense de FeO en Fe_2O_3, des pertes peu accusées pour MgO et beaucoup plus marquées pour CaO et Na_2O, et une résistance remarquable de K_2O.

Ces remarques sont corroborées par le calcul des rapports moléculaires qui fournissent des indications sur la mobilité relative des éléments chimiques. Ces derniers peuvent être classés comme suit, par ordre de mobilité croissante :

$$K_2O,\ SiO_2,\ Al_2O_3 < MgO < Na_2O < CaO$$

Fe_2O_3 pouvant, suivant les situations, s'intercaler entre MgO et Na_2O comme à la Pierre-qui-Vire, ou au contraire figurer à côté de CaO comme à Saint-Léger.

Les mêmes constatations ayant été formulées par D. COLLIER (1951 et 1961), on peut leur assigner également une portée générale pour caractériser l'altération chimique des granites du Massif central et du Morvan. Il faut signaler une fois de plus la constance quasi parfaite, et de surcroît identique dans les profils sur granites à 2 micas, du rapport SiO_2/K_2O, qui atteste d'une part la remarquable homogénéité du massif et de ses zones d'altération dans les teneurs en ces 2 éléments, et d'autre part l'invulnérabilité des feldspaths potassiques qui absorbent la majeure part de K_2O. Quant au rapport SiO_2/Al_2O_3, il montre des oscillations en définitive plus accusées que celui de SiO_2/K_2O, surtout dans les échantillons sur granite porphyroïde, ce qui justifie la position de ces éléments à la suite de K_2O dans l'échelle des mobilités relatives.

Essais de bilans de l'altération chimique

Comme les analyses le laissaient prévoir, les trois essais de bilans globaux de l'altération chimique font apparaître, au cours des transformations complexes qui affectent la zone superficielle de ces granites, des différences très faibles dans les compositions minéralogiques des divers horizons des profils, les pertes étant imputables probablement à l'entraînement d'une partie du complexe d'altération, et à la solubilisation d'une fraction des éléments les plus vulnérables. Il est de plus intéressant de noter, quels que soient les faciès étudiés, que ces estimations sont très voisines : 3,6 p. 100 et 4,3 p. 100 pour Saint-Léger et la Pierre-qui-Vire, depuis le granite frais jusqu'au sol ; pour Saint-Brisson, cette évolution est plus sujette à caution, eu égard aux variations locales de composition du matériau de référence, mais si l'on choisit une valeur moyenne pour le Quartz, le bilan aboutit à 4,5 p. 100 de pertes, valeurs identiques par conséquent aux deux précédentes. Quant à l'arène, l'exemple de la Pierre-qui-Vire indique que les pertes enregistrées au cours de cette étape de l'altération sont moins accusées qu'au cours de la suivante donnant naissance au sol. Nous avons indiqué en effet au cours des paragraphes précédents, la reprise des phénomènes d'altération à ce niveau, marqués par la microdivision intense des effectifs granulométriques, et la transformation accélérée des Plagioclases en argile. Corrélativement, il est donc normal que les pertes soient plus accusées — tout en demeurant par ailleurs très faibles.

Un autre élément fourni par l'examen de ces bilans minéralogiques est de comparer la vulnérabilité des minéraux fondamentaux des granites. Si l'on s'adresse aux Phyllites, on vérifie la résistance de la Muscovite — qui paraît même supérieure à celles des Feldspaths potassiques, dont une part de l'ordre de 10 p. 100 peut s'altérer à Saint-Brisson — la faible décomposition de la Biotite, et l'extrême vulnérabilité des Plagioclases, ce qui confirme ce sur dernier point les travaux de F. LELONG (1964) sur les granites de la Guyane française et ceux de V. GABIS (1965) dans le Velay.

On peut également tirer une autre indication intéressante de ces bilans relati-

vement à l'intensité d'altération de la Cordiérite. Le tableau 7 nous a appris que dans les sols — dont deux échantillons seulement ont été analysés — environ 35 p. 100 de l'ensemble Micas + Cordiérite étaient argilisés. Compte tenu de la résistance de la Muscovite et de la faible vulnérabilité de la Biotite, il faut en conclure à la fragilité de la Cordiérite, qui fournit aussi la majeure part du matériel argilisé de type Illite.

Enfin, malgré les différences sensibles de composition minéralogique du granite à Biotite de Saint-Léger et des granites à 2 micas de la Pierre-qui-Vire et de Saint-Brisson — 30,5 p. 100, 37,5 p. 100 et 38,5 p. 100 de Quartz respectivement — ils s'altèrent tous trois suivant la même intensité physique et chimique et ont de la sorte un comportement tout différent des granites de Corse pour lesquels A. RONDEAU (1961) accordait une priorité quasi absolue au critère de la composition minéralogique pour rendre compte des effets de l'érosion différentielle dans cette région. Partageant à ce sujet l'opinion de P. BIROT (1964), l'exemple du massif de la Pierre-qui-Vire suffit à montrer qu'il ne saurait expliquer toutes les situations et qu'il ne constitue qu'un élément — certes fondamental — du grand problème de l'arénisation des roches cristallines.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'arénisation des granites à 2 micas de la Pierre-qui-Vire se caractérise donc par une intense désagrégation physique et une faible altération chimique — tout comme ceux du Massif central étudiés par D. COLLIER (1951 et 1961).

Le matériau originel devient meuble sur une grande épaisseur, tout en demeurant cohérent aux affleurements, et l'on vérifie au sein des arènes la faible amplitude de l'argilisation des Plagioclases et de l'ensemble Micas + Cordiérite.

Par contre, il semble exister une rupture nette entre les arènes et les sols où les phénomènes d'altération physico-chimique s'accélèrent brusquement de façon accusée, montrant ainsi que les facteurs mis en cause dans ces processus ne sont probablement pas les mêmes dans les deux formations. D'autres études, que nous nous proposons d'aborder ultérieurement, seront nécessaires pour préciser cette observation.

L'âge d'une telle évolution extrêmement lente, et que les manifestations glaciaires nous autorisent à considérer antéwürmienne, nous paraît en réalité très ancienne, au moins tertiaire. Cette hypothèse d'une longue période d'altération pour le démantèlement des roches cristallines de l'ensemble du Morvan avait été proposée également par J. BEAUJEU-GARNIER (1951). De même A. GODARD (1961) étudiant en particulier la dégradation du socle cristallin de l'Écosse, envisage que son altération a pu s'élaborer durant le Villafranchien et peut-être même antérieurement à cette époque géologique. Il semble qu'il y ait ainsi accord des auteurs quant à l'antériorité de l'arénisation, phénomène sans doute polycyclique dû au rajeunissement constant des zones au contact du granite, et comportant notamment des phases plus agressives auxquelles peuvent succéder des périodes de stabilité relative. Toutefois R. STRUILLOU (1965), à la suite d'observations dans la région d'Avallon, pense que ce processus peut dans certaines conditions être très rapide.

TABLEAU 19

Détermination de la porosité des granites frais

N° échantillon	Localisation	Résistance appréciée sur le terrain	Porosité totale en p. 100	Mégapores < 95 μ en p. 100	Macropores > 8 μ en p. 100	Micropores < 8 μ en p. 100
21	Granite à gros grain La Pierre-qui-Vire	Arénisation profonde	2,75	0	0,05	2,70
33	Granite à gros grain Le Bon-Ru	Très dur utilisé pour la construction de monuments funéraires	1,90	0	0,05	1,85
37	Granite à grain fin, sommet d'un versant La Roche-des-Fées	Très résistant. Pas d'arène	3,40	0	0,10	3,30
51	Granite à grain fin Saint-Agnan	Arénisé	0,40	0	0	0,40
60	Granite à grain fin Eschamps	Très résistant. Pas d'arène	0,60	0	0	0,60
63	Granite à grain fin mylonitisé La Roche-en-Brenil	Le plus résistant de tous Construction de ballasts de chemin de fer	0,21	0	0	0,21
71	Granite à grain moyen Saint-Brisson	Arénisé	1,63	0	0,10	1,53
91	Granite à gros grain Bois-des-Montées	Résistance faible, arénisation profonde	0,75	0	0	0,75
100	Granite à gros grain Forêt de Breuil	Résistance faible, arénisation intense	3,7	0	0,10	3,60

L'une des caractéristiques les plus marquantes de ces granites à 2 micas du Morvan-Nord est leur comportenmet quasi-identique à celui du granite porphyroïde à Biotite de Saint-Léger avec lequel ils entrent en contact, alors que selon M. DERRUAU (1962), ils s'avèrent de façon générale plus résistants que les granites purs « en raison de la plus faible proportion de Biotite et de l'invulnérabilité de la Muscovite ». Et de fait, plusieurs chercheurs opposent souvent les contrastes imposés dans le paysage par les 2 catégories de socles granitiques. C'est ainsi que H. BAULIG (1938) parle de la « dure granulite » de la Montagne limousine qu'il compare au granite sans Muscovite plus altérable, que A. RONDEAU (1961) décrit l'opposition constante en Corse, quelle que soit l'altitude et le système d'érosion, entre les paysages imposés par les 2 types de roches, que J. PELLETIER (1960) souligne cette même différenciation très accusée dans le nord-est de la Sardaigne. Il n'est pas possible d'établir ici une telle distinction et la présence de Muscovite n'a pas conféré à la roche une résistance particulière. En eût-il été autrement si la proportion de ce minéral avait été plus importante ?

L'examen de la porosité de plusieurs échantillons frais a été effectuée à l'aide du porosimètre à mercure par P. BIROT (1965), au laboratoire de Géomorphologie de l'Université de Paris, procédé de mesure qui vient faire de l'objet d'une discussion de la part de A. GODARD (1965). Les résultats sont consignés dans le tableau 19.

Si l'on compare ces résultats avec la résistance des roches appréciée simplement sur le terrain, il n'est pas possible d'établir une corrélation valable dans tous les cas. Cependant celle-ci existe d'une manière irréfutable pour l'échantillon 63 de la Roche-en-Brenil, sans aucun doute le plus dur de ceux examinés dans l'ensemble du massif sur 120 granites observés ; or c'est celui qui a la plus faible porosité totale : 0,21 p. 100. Cette corrélation est aussi très satisfaisante pour les échantillons 51 et 60, considérés comme résistants. Par contre, elle n'apparaît pas pour les échantillons 37, 91 et 100. En particulier, le n° 91, est l'un des granites dotés de la résistance la plus faible et sa porosité n'atteint que 0,75 p. 100.

Si ce critère se révèle majeur pour rendre compte de l'altération différentielle des roches, il faut bien souligner combien il est difficile de les comparer à un stade de fraîcheur aussi voisin que possible. Il est probable que si ces granites de la Pierre-qui-Vire avaient pu être prélevés dans une zone suffisamment profonde où les agents de l'altération n'ont que peu d'emprise, les résultats auraient été différents et sans aucun doute plus en accord avec les observations sur le terrain.

Enfin — et ce qui confère au massif toute son originalité —, lorsque les conditions topographiques sont identiques, la décomposition des granites de la Pierre-qui-Vire, aussi bien physique que chimique, apparaît la même pour les 3 faciès principaux, à l'exception toutefois des types à grain très fin rebelles à toute désagrégation, ce qui limite singulièrement dans le cas de ce gisement le rôle de la taille des cristaux (J. DEJOU et J. LAMEYRE, 1965). La particularité de ce massif est ainsi de représenter un cas assez exceptionnel où les variations de la dimension des grains ne s'accompagnent pas de modification dans la composition chimique et minéralogique.

Reçu pour publication en janvier 1967.

REMERCIEMENTS

Je me dois, en terminant ce mémoire, de remercier très vivement tous ceux qui m'ont apporté leur précieuse collaboration : Mme MERGOIL et Mlle BARRAU du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand, qui ont exécuté les diagrammes des rayons X et les analyses thermo-pondérales des argiles, M. le Professeur BIROT, de l'Institut de Géographie de Paris qui a bien voulu effectuer les mesures de porosité de plusieurs échantillons, mon collègue J. GUYOT qui s'est chargé de la détermination des surfaces des argiles, enfin les techniciens des Stations de Dijon et de Châteauroux qui ont exécuté avec beaucoup de soin de longues analyses ; qu'ils soient tous remerciés de leur précieux concours et qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

SUMMARY

WEATHERING OF TWO-MICAS GRANITES IN THE MASSIF OF LA PIERRE-QUI-VIRE

Whatever their facies, the two-micas granites in the La-Pierre-qui-Vire Massif exhibit, (provided that they two-micas are in a comparable morphological attitude), conspicuous physical weathering effects that supervened *in situ*. Save for some exceptions in the fine-grained types which were unaffected by weathering, their decomposition gives rise to gravelly sands constituting veritable geological formations whose structure is much the same from one deposit to another : from bottom to top, the weathered granite is deeply fissured ; above, this is the gravelly sand, where the rock underwent marked physical weathering over a visible height of 5 to 6 metres at top of which the soil is usually immature (a part from wooded areas). Yet, the particular nature of the weathering these granites were subjected to, should be noted : flat structure of some deposits, fields of blocks and corrosion pockets, periglacial phenomena and reddening of some natural gravels.

By comparing several techniques, it was possible to identify the nature of the clayey material, denoting the last stage of the physico-chemical changes that occurred within the natural gravels and soils. Kaolinite forms the greater part (70 to 80 p. 100) of the illite-containing aggregates but also includes a fraction of expansible-granule minerals such as montmorillonite and vermiculite.

The chemical alteration of these granites, from the standpoint of magnitude, makes a vivid contrast with that physical, it being moderate, the aggregate losses from the parent rock to the soil being estimated at 2 to 5 p. 100 (by comparing the mineral compositions of the various geological sections and selecting quartz as reference since it is the stronger mineral).

The behaviour of these muscovite granites is in every way like that of the Saint-Léger purelybiotitic pseudoporphyritic granite, whereas, according to M. DERRAU (1962), these rocks usually exhibit greater strength.

But the salient feature of the massif is the rather uncommon instance where grain-size variations do not correlate with any chemical or mineral change in the samples and apparently do not affect in any way the déterminism of arenation.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE VERWITTERUNG DER ZWEIMIKAGRANITE
IN DEM GEBIRGSSTOCK LA PIERRE-QUI-VIRE

Die Zweimikagranite vom Pierre-qui-Vire zeigen, welches auch ihr Aussehen sein mag, eine wichtige, an Ort und Stelle erworbene physikalische Veränderung, wenn sie in vergleichbarer morphologischer Stellung liegen. Ausser einigen Ausnahmen in dem feinkörnigen Typus, der unverändert bleibt, verursacht ihre Verwitterung tiefe Sandbildungen, die eine richtige geologische Formation ergeben, und die, für verschiedene Lagerungen einen vollkommen vergleichbaren Aufbau darstellen : vom Grund bis zur Höhe, trifft man den verwitterten, stark gespaltenen Granit ; die eigentliche Sandformation, wo das Gestein auf 5 bis 6 Meter Höhe sichtbare intensive physikalische

Verwitterung erlitten hat, und der Boden, der wenigstens ausserhalb der Wälder, im allgemeinen eine leichte Evolution aufweist. Jedoch muss auf einige Einzelheiten der Verwitterung dieser Granite hinweisen werden : Fläche — Struktur einiger Lagerstätten — chaotische Blöcke und vorkommen von becherförmigen Gebilden — periglaziale Erscheinungen und Rötung gewisser Sandformationen.

Durch Gegenüberstellung verschiedener technischer Verfahren wurde es möglich, die Natur des Tonmaterials, das die letzte Phase der physico-chemischen Umwandlungen in den Sandformationen und den Böden darstellt, zu identifizieren. Der Kaolinit bildet den Hauptteil (70 bis 80 p. 100) der Illithaltigen Mischungen, aber auch eine Fraktion der Minerale mit ausdehnbarem Gitter des Typus Montmorillonit und Vermikulit.

Was die chemische Verwitterung dieser Granite anbetrifft, steht diese, in Hinblick auf die Intensität, in völligem Gegensatz zur physikalischen Verwitterung. Sie erweist sich als sehr gering ; denn durch Vergleich der mineralogischen Zusammensetzungen der verschiedenen Schichten der Bodenprofile und durch Wahl des Quarzes als Referenz für das widerstandfähigste Mineral, lassen sich die gesamten Verluste vom Muttergestein bis zum Boden zu 3 bis 5 p. 100 abschätzen.

Das Verhalten dieser Zweimikagranite ist in jeder Hinsicht dem Biotit-Porphyrgranit von Saint-Léger ähnlich, während, laut Mr DERRUAU (1962), diese Gesteine gewöhnlich eine grössere Widerstandsfähigkeit aufweisen.

Aber die bemerkenswerteste Originalität dieses Gebirgsstockes besteht darin, dass er ein ziemlich ausnahmsweiser Fall ist, wo die Variationen der Korngrösse keinerlei Veränderung der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der Stichproben betreffen und auch keinen Einfluss auf den Determinismus der Sandbildung vermuten las.

Выветривание гранитов содержащих две слюды в массиве Пьер-ки-Вир.

Ж. ДЭЖУ.

РЕЗЮМЭ

Граниты Массива Пьер-ки-Вир, содержащие две слюды, представляют, каковы — бы ни были их фации, картину интенсивного физического выветривания на месте, в случаях когла они занимают одинаковые морфологические позиции. За исключением отдельных случаев типа мелкозернистых гранитов мало подверженных выветриванию, их распадение вызывает образование глубоких арен, представляющих настоящие геологические образования с совершенно одинаковой архитектурой, вне зависимости от месторождения : от основания и до верхушки можно отметить, выветрившийся и сильно потрескавшийся гранит; арена активности — где порода, на видимую высоту в 5-6 метров подверглась интенсивному физическому распаду; и наконец — почва с обычно мало проявленной эволюцией, особенно в отсутствии лесного покрова. Необходимо, однако, отметить некоторые особенности выветривания этих гранитов : плоскостная структура некоторых месторождений, — хаос из глыб и присутствие плюсковидных форм, — периглациальные проявления и покраснение некоторых арен активности.

Сопоставление разного рода технических приемов позволило распознать природу глинистых материалов представляющих собой последнюю фазу физико-химических изменений внутри арен и почв. Большая часть смесей состоит из каолинита (70-80 %), содержащего иллит и фракцию минераллов с расширяющейся решеткой типа Монмориллонита и Вермикулита.

Что-же касается химического выветривания этих гранитов, то между этим процессом и выветриванием физическим существует основная разница — в смысле их интенсивности, которая в первом случае — не очень сильна. Общие потери вычисленные начиная с материнской породы — до почвы, представляют только 3-5 % по сравнению с минералогическим составом

разных горизонтов профилей и в случае принятия кварца в качестве наиболее устойчивого минерала.

Процесс выветривания этих двух сортов гранита содержащих две слюды протекает совершенно также как и процесс разрушения порфироидного гранита в Сан-Лежэ содержащего только биотит, в то время как по мнению Дэррюо (1962) эти породы должны-бы были быть более устойчивыми.

Но самой характерной оригинальностью массива Пьер-ки-Вир является то, что он представляет довольно исключительный случай, при котором изменения размеров зерна породы не вызывают никаких изменений химического и минералогического состава проб и как-будто не имеют никакого влияния на направление которое примет аренизация.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDRÉ J., DEJOU J., SAJOT M., 1956. Contribution à l'étude de certains phénomènes de transport ayant affecté les arènes granitiques du Morvan-Nord. *Cah. Labo. Géogr. Fac. Lettres*, Dijon, nº 1-2, p. 2-32, 4 croquis.

BASTISSE E. M., 1947. Contribution à la détermination du type minéralogique des argiles des sédiments. Sols naturels en place et terres de culture. *Ann. agron.*, p. 398-453.

BAULIG H., 1928. *Le plateau central de la France et sa bordure méditerranéenne. Étude morphologique.* A. Colin, Paris, 574 p., 33 reproductions h. t., 11 cartes.

BEAUJEU-GARNIER Jacqueline, 1951. *Le Morvan et sa bordure. Étude morphologique.* Thèse, Paris 288 p.

BIROT P., 1959. *Précis de géographie physique générale.* A. Colin, Paris 403 p.

BIROT P., avec la collaboration de S. HÉNIN, Y. GUILLIEN, J. DELVERT, 1962. *Contribution à l'étude de la désagrégation des roches.* C. D. U., Paris 232 p.

BIROT P., 1964. Notes et compte rendus sur la thèse de A. RONDEAU. Recherches géomorphologiques en Corse (1961). *Ann. Géogr.*, nº 395, LXXIIIe année, p. 71-74.

BLANCHET R., GUYOT J., CHAUSSIDON J., CROUZET J., CHAUMONT Colette, 1965. Influence prédominante des argiles illitiques sur l'alimentation potassique des plantes dans divers types de sols. *Ann. agron.*, **16** (2), 177-202.

BONHOMME M., LASSERRE J., 1961. Prélèvement et préparation des échantillons de micas pour mesure d'âge. *Trav. Labo. Géol. et Min. Fac. Sci. Clermont-Ferrand*, Série Documentation nº 18, 9 p.

BONIFAS Marthe, 1959. *Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique.* Mém. Serv. Carte Géol. d'Alsace-Lorraine, Thèse, nº 17, 159 p., 5 planches h. t.

BONNAMOUR Jacqueline, 1966. *Le Morvan, la terre et les hommes. Essai de géographie agricole.* Thèse, Géographie Fac. Lettres, Paris, P. U. F. 454 p.

BOWER C. A., GOERTZEN J. O., 1959. Surface area of soils and clays by an equilibrium ethylene glycol method. *Soil. Sci.*, **87** (5), 289-292.

BROWN G., 1961. The X-ray identification and crystal structure of clay minerals. *Mineral. Clay Min. Group Londres*, p. 386 et suiv., p. 425-437.

CAILLÈRE S., JOURDAIN A., 1956. Sur quelques particularités de la formation argileuse de la région de Montguyon (Charente-Maritime). *Bull. Gr. fr., Argiles*, (7), 31-39.

CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1963. *Minéralogie des argiles.* Masson et Cie, Paris 355 p.

CARRAT H. G., 1965. Sur les relations entre les différents stades de la granitisation hercynienne dans le socle granitique du Morvan septentrional, et ceux du faisceau synclinal du Morvan. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 261, groupe 9, p. 5 153-5 156.

CARTER D. L., HEILMAN M. D., GONZALEZ C. L., 1965. Ethylene glycol monoethylether for determining surface area of silicate minerals. *Soil Sci.*, **100** (5), 356-360.

CHAUSSIDON J., 1961. Étude de l'environnement ionique et des propriétés électrochimiques de surface des particules d'argile en suspension. *Thèse, Paris*, p. 19-27.

COLLIER D., 1951. *a* Contribution à l'étude de l'altération des granites et de l'évolution des sols sur les plateaux granitiques de l'Auvergne. *Bull. A. F. E. S.*, 23 p. 1-12.

Collier D., 1951 *b*. Sur l'altération des granites à gros grain en Auvergne. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **233** (1), p. 96.

Collier D., 1951 *c*. Sur l'altération des granites à grain fin en Auvergne. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **233** (2), p. 199.

Collier D., 1961 *d*. Mise au point sur les processus de l'altération des granites en pays tempéré. *Ann. agron.*, **12** (3), 273-331.

Dejou J., 1959. *Étude comparative des phénomènes d'altération sur granite porphyroïde de Lormes et sur anatexites à cordiérite du Morvan-Nord et les sols qui en dérivent.* Thèse, Clermont-Ferrand, I. N. R. A., Paris, 164 p.

Dejou J., Lameyre J., 1965. Rôle du grain dans l'altération des granites à deux micas de la Pierre-qui-Vire (Yonne-Nièvre). *C. R. Somm. S. G. F.*, **3**, 94-95.

Derruau M., 1962. *Précis de géomorphologie.* Masson et Cie, Paris 413 p.

Dyal R. S., Hendricks S. B. Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. *Soil. Sci.*, **69**, p. 421-432.

Escard J., 1952. Les méthodes d'adsorption. Adsorption des gaz. *Bull. Gr. fr., Argiles*, **3**, 79-84.

Fripiat J. J., Gastuche M. C., 1952. Étude physico-chimique des surfaces des argiles. Les combinaisons de la kaolinite avec les oxydes de fer trivalent. *I. N. E. A. C., Série Sci.*, **54** (60 p. + 20 photos h.-t.).

Gabis V., 1965. Quelques aspects de la minéralogie et de la géochimie de la série sédimentaire oligocène du Velay. *Bull. Gr. fr., Argiles, C. N. R. S.*, **16**, nouvelle série, n° 11, 49-57.

Gèze B., 1959. La notion d'âge du sol. Son application à quelques exemples régionaux. *Ann. agron.*, n° 3, 237-255.

Godard A., 1962. Essais de corrélation entre l'altitude des reliefs et les caractères pétrographiques des roches dans les socles de l'Écosse du Nord. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **255**, 139-141.

Godard A.,1963 *a*. Morphologie des socles et des massifs anciens. A propos de quelques thèses françaises récentes *Rev. Géogr. Est*, **1**, 75-92.

Godard A., 1965*b*. Morphologie des socles et des massifs anciens. Questions d'altération. Quelques problèmes. posés par l'étude de la porosité des roches cristallines. *Rev. Géogr. Est*, **1**, 91-101.

Grim R. E., 1953. *Clay Mineralogy*. Mc. Graw Hill, New York.

Guillien Y., 1955. La couverture végétale de l'Europe pléistocène. *Ann. Géogr.*, n° 344, LXIV année, 241-276, 2 planches h. t. et 9 figures dans le texte.

Heilman M. D., Carter D. L., Gonzalez C. L., 1965. The ethylene-glycol monoethylether (E. G. M. E.) technique for determining soil surface area. *Soil Sci.*, **100** (6), 409-413.

Jackson M. L., Hseung Y., Corey R. B., Evans E. J., Vanden-Heuvel R. C., 1952. Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments. II. Chemical weathering of layer-silicates. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **16**, (1), 3-6.

Jackson M. L., 1959. Frequency distribution of clay minerals in major great soils groups as related to the factors of soil formation. *Proc. Sixth nation. Conf. on clays and clay minerals*, Pergamon Press, **2**, 133-143.

Jackson M. L., 1965. Clay transformations in soil genesis during the Quaternary. *Soil Sci.*, **99** (1), 15-22.

Janssens J. P., 1952. Dosage du Quartz. *Rev. Matériaux*, n° 432.

Lelong F., 1964. Étude minéralogique d'un profil d'altération sur roche granitique en Guyane française. Trav. Centre Rech. Pétrogr. géoch. Nancy. *Bull. Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine*, Strasbourg, **17** (4), 263-286.

Lucas J., Camez Thérèse, Millot G., 1959. Détermination pratique aux rayons X des minéraux argileux simples et interstratifiés. *Bull. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine*, Strasbourg, **12** (2), 21-31.

Mémoire du laboratoire de Géographie, Fac. Lettres, Dijon, 1955. *Etudes granulométriques. Établissement et traitement statistique des courbes.* 10 p.

Mériaux Suzanne, 1962. Quelques applications des méthodes statistiques à la caractérisation des sédiments et des sols. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **13**, nouvelle série, (8), 19-25.

Millot G., 1964. *Géologie des Argiles. Altération. Sédimentologie. Géochimie.* Paris, Masson et Cie, 499 p.

Molloy M. W., Keer P. F., 1961. X-ray patterns of A. P. I. référence clay minerals. *Ann. Mineralogist*, **46** (5) et (6), 583-605.

Nadeau J. C., 1961. Evaluation de la proportion et de la nature des réseaux expansibles dans un mélange d'argiles. *C. R. Acad Sci.* Paris, **253**, (1), 162-164.

McNeal B. L., Sansoterra T., 1964. Mineralogical examination of arid-land soils. *Soil Sci.* **92** (6), 367-375.

Orliac J. 1961. Séparation des feldspaths potassiques par densité. *Trav. Labo. Géol. Min. Fac. Sci.*, Clermont-Ferrand, Série Documentation, n° 28 2 p.

Pédro G., 1959. Considérations sur une forme de l'altération des roches : l'arénisation. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **248**, 993-996.

Pelletier J., 1960. Le relief de la Sardaigne. *Mém. Doc. de l'I. E. R.* Lyon, voir p. 121-156.

Roberson H. E., Jonas E. C., 1965. Clay minerals intermediate between illite and montmorillonite. *Ann. Mineralogist*, **50**, (5-6), 766-770.

Robert M., 1966. Sur la nature des phénomènes de désagrégation, d'arénisation et d'altération chimique ; études expérimentales. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **262**, série D, (14), 1519-1522.

Rondeau A., 1961. *Recherches géomorphologiques en Corse. La part de la tectonique et de l'érosion différentielle dans le relief de l'Ile.* Thèse, Paris, 573 p., 1 pochette de fig., 1 carte morphologique au 1/200 000.

STRUILLOU R. *a*) 1965. Lessivage des roches à feldspaths par l'eau, en pays tempéré. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **261**, groupe 9, 179-182.

— *b*) 1965. Rôle du fer dans l'altération rapide des feldspaths en pays tempéré. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **261**, groupe 9, 485-488.

VIALETTE Y., 1963. Ages absolus par la méthode au strontium des lépidolites du Massif central français. *C. R. 88e Congr. nation. Soc. Sav. Clermont-Ferrand*, 275-290.

VIALETTE Y., 1965. Colloque international de Géochronologie absolue (en cours de publication).

WALKER G. F., 1949. The decomposition of biotite in the soil. *Mineral. Mag.*, **28**, 693-703.

ANNEXE I

Massif de granites à 2 micas de la Pierre-qui-Vire

Nature des échantillons étudiés et lieu de récolte

N° des échantillons	Nature de l'échantillon	Lieu de récolte	Coordonnées (carte I. G. N. au 1/50 000
11	Granite à 2 micas à gros grain	Monastère de La Pierre-qui-Vire (Yonne)	Quarré-les-Tombes 731,2 × 262,8
12	Granite un peu altéré		
13	Granite très altéré	Près du parking entrée Monastère	Quarré-les-Tombes 730,5 × 263,5
14	Arène		
15	Sol sur arène granitique		
22	Granite à 2 micas à gros grain	Le long du Trinquelin La Pierre-qui-Vire	Quarré-les-Tombes 730,7 × 262,9
23	Granite altéré	En face de la chapelle du Monastère de la Pierre-qui-Vire	Quarré-les-Tombes 730,5 × 263,1
24	Arène		
25	Sol sur arène granitique		
41	Granite porphyroïde à Biotite	Forêt Saint-Léger-Vauban (Yonne)	Quarré-les-Tombes 730,3 × 265,3
42	Granite très altéré		
43	Arène profonde		
44	Arène superficielle		
45	Sol sur arène : horizon A		
46	Sol : horizon A_0		
51	Granite à grain fin à 2 micas	Saint-Agnan (Nièvre)	Saulieu-733,6 × 265,3
52	Granite altéré		
53	Arène profonde		
54	Arène moyenne		
55	Arène solifluée au-dessus de l'arène en place		
56	Sol sur arène : horizon A		
57	Sol : Horizon A_0		
58	Matériel localisé dans les grandes diaclases		
71	Granite à 2 micas à grain moyen	Saint-Brisson (Nièvre)	Saulieu-731,4 × 252,2
72	Granite altéré		
73	Arène		
74	Sol sur arène		
90	Arène rubéfiée sur granite à 2 micas à gros grain	Champ-au-Beau près de Saint-Germain-de-Maudéon	Quarré-les-Tombes 735,8 × 264,7
90 *bis*	Granite à 2 micas à gros grain	Bois-des-Montées-Route Quarré-les-Tombes Saint-Brisson	Saulieu-731,3 × 257,8
92	Granite altéré		
93	Arène profonde		
94	Base du sol sur arène		
95	Sommet du sol sur arène		
96	Sol : horizon A_0		
100	Granite à 2 micas à grain moyen	Forêt de Breuil (Nièvre)	Saulieu : 730 × 255,1
101	Granite altéré		
102	Arène rubéfiée		
103	Sol sur arène		

ANNEXE II

Massif de granite à 2 micas de la Pierre-qui-Vire

Coupes non étudiées où les phénomènes d'arénisation peuvent être observés

N° des profils	Caractéristiques du profil	Lieu de récolte	Coordonnées (carte I. G. N. au 1/50 000)
	I — *Granites à gros grain*		
16	Très belle coupe d'arène avec feldspaths orientés dans sa partie supérieure.	Poil-Chevré	Quarré-les-Tombes : 727,6 × 262,3
17	Arène de 1,5 m d'épaisseur dont les éléments sont orientés parallèlement à la surface topographique. Au-dessus, sol lessivé profond, de 60 cm environ.	Entre les hameaux des Guichards et le moulin de Breuillote	Quarré-les-Tombes : 728,6 × 262,2
18	Arène rubéfiée affectée de phénomènes périglaciaires (cryoturbation), épaisseur visible 2,50 m.	Les Brizards	Quarré-les-Tombes : 729,2 × 262
19	Arène rubéfiée, de type porphyroïde, fortement altérée, rappelant celles du granite de Lormes (Nièvre).	Route Rouvray-Saint-Germain-de-Maudéon	Quarré-les-Tombes : 735,3 × 267,2
20	Arénisation générale : arène du type La Pierre-qui-Vire.	Montachon	Saulieu : 737,4 × 259,5
26	Arène identique au n° 20.	Crépy-le-Boulois	Quarré-les-Tombes : 737,2 × 261,4
27	Arène riche en muscovite ; 2,50 m d'épaisseur visible en zone de plateau. Très grosses boules granitiques en surface.	Étang des Pontarnaux	Saulieu : 729,7 × 258,6
	II — *Granites à grain moyen*		
28	Arène typique dans une enclave de granite à grain moyen, en zone remarquablement aplanie.	Les Brûlées, route de Maison-Baude	Saulieu : 739 × 257,7
29	Très forte arénisation de plusieurs mètres d'épaisseur, riche en muscovite, dans une enclave de granite à grain moyen au sein du granite à gros grain.	La Mouille sur la route N 6, Saulieu-Paris	Saulieu : 741,2 × 258
30	Importante arénisation. Couleur rougeâtre de l'arène.	Les Michaux-les-Ruez	Saulieu : 734 × 260,2
50	Arénisation sur un matériel colluvial.	Route des Amans, Saint-Agnan. Extrémité est du Bois-des-Montées	Saulieu : 732,1 × 258,9
69	Arénisation très importante (2 à 3m) en zone de plateau, au dessus de la vallée de la Cure.	Le Gué-de-Dun et route forestière de Fongis	Saulieu : 725,3 × 259,5

ANNEXE II (suite)

N° des profils	Caractéristiques du profil	Lieu de récolte	Coordonnées (carte I. G. N. au 1/50 000)
	III — *Granites à grain fin*		
82	Intense arénisation dans un granite à grain fin à quartz globulaire et riche en enclaves de cordiérite.	Moulin-Colas	Quarré-les-Tombes : 727,5 × 264,1
	IV — *Granites à grain très fin non arénisés*		
60	Profil caractérisé par de très nombreuses diaclases, mais absence d'arène.	Eschamps près d'un petit affluent du Cousin	Saulieu : 736,1 × 255,9
63	Granite mylonitisé, à enclaves de Cordiérite, le plus résistant de tous ceux observés dans le massif. Absence totale d'arénisation.	La Roche-en-Brenil	Quarré-les-Tombes : 738,2 × 266,5

Ann. agron., 1967, **18** (2), 203-216.

ÉTUDE DES RELATIONS ENTRE LA COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE ET LA CONSTITUTION MINÉRALOGIQUE DES SOLS ET HORIZONS D'ALTÉRATION.

A. BLOT (1) et G. PÉDRO

Laboratoire des Sols,
Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 – Versailles

SOMMAIRE

L'étude minéralogique appliquée systématiquement aux différentes fractions granulométriques d'un horizon riche en hydrates de fer cristallisés montre que la dispersion réalisée dans les conditions habituelles des analyses, ou même après déferrification, n'est pas suffisante, de telle sorte que la granulométrie obtenue n'a pas de signification bien précise sur le plan des phénomènes d'évolution géochimique.

Si l'on veut obtenir une distribution granulométrique qui reflète exactement la répartition des particules élémentaires au sein de l'échantillon, il apparaît nécessaire de l'évaluer en associant les données de l'analyse mécanique classique à celles résultant des investigations minéralogiques ; c'est un tel état dimensionnel qui a été désigné ici sous le nom de « granulométrie virtuelle » de l'échantillon.

I. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES RAPPORTS ENTRE LES TRANSFORMATIONS MINÉRALOGIQUES ET L'ÉVOLUTION GRANULOMÉTRIQUE DES ROCHES AU COURS DES PHÉNOMÈNES D'ALTÉRATION

L'altération chimique qui affecte les roches lorsqu'elles affleurent à la surface du globe se traduit toujours à première vue, par une perte de la massivité du substratum sur une plus ou moins grande épaisseur. De nos jours, il est bien connu que l' « ameublissement » ainsi obtenu résulte de la dégradation des minéraux « vulnérables » de la roche de départ, qui, en se transformant dans la masse, donnent naissance à de nouveaux édifices (minéraux secondaires) caractérisés généralement par

(1) O. R. S. T. O. M., Section de Géologie.

une taille submicroscopique ($\varnothing < 2\ \mu$), un caractère cryptocristallin et une structure lamellaire. Quant aux minéraux résistant aux phénomènes de décomposition, ils n'évoluent pratiquement pas de telle sorte que leur taille originelle est à peu près maintenue, au moins dans les zones extratropicales, au cours de l'altération.

De ce fait, si l'on connaît la proportion et la dimension des espèces résistantes au sein de la roche-mère d'une part, la proportion des minéraux altérables et la nature des composés de néogenèse qui en proviennent (argile : $\varnothing < 2\ \mu$) d'autre part, on peut espérer avoir une assez bonne idée de la constitution granulométrique du sol *à la fin* de l'évolution. Ainsi, un granite normal, dont la composition minéralogique est : quartz = 30 p. 100, feldspaths = 55 p. 100, mica = 15 p. 100, doit logiquement aboutir à un niveau d'altération contenant *grosso modo* 40 p. 100 de sable ($\varnothing > 50\ \mu$) le reste étant formé essentiellement par de l'argile ($\varnothing < 2\ \mu$) (1). Certes, il n'est pas possible de faire des prévisions plus fines et de procéder par exemple à une répartition dans les différentes classes granulométriques correspondant à une dimension supérieure à 2 μ. Mais, à ce niveau d'analyse, cela n'a guère d'importance ; on sait aujourd'hui, en effet, que les sols les plus anciens ne sont constitués granulométriquement que par de l'argile et du sable (cf. A. VAN WAMBEKE, 1959).

De ce point de vue, l'examen de la granulométrie d'un sol, c'est-à-dire de la répartition des particules constitutives en fonction de leur taille, apparaît comme un des éléments essentiels de la connaissance des phénomènes de décomposition superficielle et en particulier du *degré d'altération* en voie de développement puisqu'elle conduit à évaluer, à un instant donné, l' « état d'ameublissement » du matériel initial.

En même temps, la technique granulométrique permet d'extraire et d'étudier séparément les différentes fractions dimensionnelles d'un échantillon et plus spécialement la fraction « argile » qui, comme on vient de le préciser, représente, à elle seule, ce que l'on désigne habituellement sous le nom de « complexe d'altération » et qui réunit de la sorte l'ensemble des minéraux secondaires résultant de la décomposition (argiles phylliteuses, hydroxydes...).

Il convient toutefois d'ajouter qu'une telle méthode d'étude n'a réellement un sens sur le plan de l'évolution minéralogique et du bilan de l'altération que si elle conduit à une distribution granulométrique qui reflète *exactement* la répartition des particules *élémentaires* (primaires ou secondaires) au sein de l'échantillon. Or, dans les formations meubles, celles-ci sont assemblées en général pour constituer des sortes d'agrégats, c'est-à-dire des édifices complexes résultant de la présence de constituants colloïdaux maintenus à l'état floculé, ou (et) de l'existence de liants organiques, ou (et) encore de la croissance d'espèces minérales secondaires possédant un fort pouvoir d'enrobement et de cimentation (oxydes et hydroxydes par exemple).

Il est donc nécessaire de détruire ces agrégats qui, par ailleurs, sont plus ou moins stables, au cours d'une série d'opérations précédant l'analyse granulométrique à proprement parler. Habituellement, ces opérations préliminaires comportent une minéralisation de la matière organique, réalisée au cours d'une attaque à l'eau oxygénée, suivie d'une élimination des ions floculants et d'une mise en suspension stable à l'aide de dispersants de diverse nature.

(1) Ces chiffres approximatifs sont donnés compte tenu des éléments qui sont exportés avec les eaux de drainage au cours de l'évolution minéralogique. Mais pour obtenir des valeurs plus précises, il est nécessaire de savoir au préalable si l'argile de néoformation est de type 2/1 ou 1/1.

Mais il reste alors à déterminer si, dans certains cas et en particulier dans le cas d'échantillons riches en fer (horizons de sols tropicaux ou hydromorphes par exemple), les techniques standardisées suffisent à provoquer une parfaite dispersion ; en d'autres termes, il s'agit de vérifier *si la granulométrie obtenue dans les conditions les plus courantes a réellement une signification minéralogique et si, de ce fait, elle peut servir de référence pour apprécier l'évolution géochimique des niveaux considérés.*

C'est à l'étude de ce problème que le présent travail est consacré.

***

Le matériau retenu à cet effet est constitué par un horizon alluvial hydromorphe à incrustations ferrugineuses, de deux mètres d'épaisseur et datant probablement de l'époque plio-villafranchienne (1). Il a été prélevé dans le Gers, au lieudit Caprecu sur la commune de Cazax (2).

L'étude a été réalisée en deux phases :

a) Détermination de la composition minéralogique des différentes fractions granulométriques séparées à l'aide des méthodes utilisées habituellement dans les laboratoires de Pédologie.

b) Détermination de la granulométrie et de la nature minéralogique du même matériel effectuée après un traitement de déferrification.

Les résultats obtenus avec les deux techniques sont discutés dans les paragraphes suivants.

II. — ÉTUDE DE LA CONSTITUTION MINÉRALOGIQUE DES DIFFÉRENTES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES (UTILISATION DES MÉTHODES CONVENTIONNELLES)

A — *Données analytiques sur la composition granulométrique de l'échantillon*

Deux méthodes de dispersion ont été appliquées simultanément à la fraction $\varnothing < 2$ mm de l'échantillon, après destruction de la matière organique et élimination des ions floculants par lavage KCl ; ce dernier traitement a été préféré à la désaturation HCl, préconisée dans les méthodes dites « internationales », pour ne pas risquer une quelconque solubilisation des oxydes de fer présents :

1. la méthode classique avec dispersion à l'ammoniaque, soit (H_2O_2 — KCl — NH_4OH) ;
2. la méthode avec utilisation de l'hexamétaphosphate de sodium (H_2O_2 — KCl — Hexamétaphosphate).

(1) La composition chimique globale du matériau est la suivante (An. J. BERRIER) :

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Perte au feu	Total
63,3	7,7	19,7	0,3	tr.	0,4	2,0	7,0	100,4

(2) Le prélèvement a été effectué par M. H. CAHUZAC, de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, que nous tenons à remercier bien vivement.

Dans les deux cas, on a suivi le protocole indiqué sommairement ci-après :

Pour chaque analyse, 10 grammes d'échantillon sont placés dans un becher avec 100 ml d'eau permutée et 25 ml d'eau oxygénée à 110 volumes, que l'on introduit d'ailleurs en plusieurs fois ; l'attaque, conduite d'abord à froid puis au bain-marie, se poursuit durant 24 heures. Lorsque la destruction de la matière organique semble terminée, la prise d'essai est mise en contact avec une solution de KCl N/10, puis lavée par centrifugation ; cette opération est recommencée 3 fois, une avec du KCl N/10 et les 2 suivantes avec du KCl N/100. Enfin, l'échantillon est disposé dans une allonge à sédimentation et l'on ajoute le dispersant, c'est-à-dire :

— soit 25 ml d'ammoniaque concentrée ;
— soit 10 ml d'hexamétaphosphate de sodium (132 g/l) et 2 ml d'ammoniaque concentrée, avant d'agiter pendant 4 heures.

L'analyse granulométrique est réalisée en utilisant la pipette de Robinson dans le cas des fractions argile et limon (leur récupération en quantité suffisante pour les investigations minéralogiques se fait toutefois par décantations successives) ; quant aux particules supérieures à 20 μ, elles sont fractionnées par tamisage. Chaque série analytique a été effectuée en double exemplaire.

***

Les résultats obtenus, exprimés en pourcentage de l'échantillon initial, représentent finalement la répartition dimensionnelle des éléments constitutifs dans les 5 classes granulométriques suivantes :

— Argiles 0-2 μ
— Limons fins 2-20 μ
— Limons grossiers 20-50 μ
— Sables fins 50 μ-0,2 mm
— Sables grossiers 0,2-2 mm

Ils sont consignés dans le tableau I

TABLEAU I

Constitution granulométrique

Méthodes	0-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-20 μ	0,2-2 mm	Total
Dispersion à l'ammoniaque (H_2O_2-KCl-NH_4OH)	30,6	25,1	13,4	12,1	18,1	99,4
Dispersion à l'hexa-métaphosphate (H_2O_2-KCl-HexaM)	25,3	28,4	14,2	11,7	20,1	100,1

L'examen de ces données met aussitôt en évidence des variations relativement importantes d'une méthode à l'autre. Ainsi, si l'on se reporte à la classification texturale adoptée au Laboratoire des Sols (R. BETREMIEUX, 1963), on constate que la texture obtenue avec la méthode à l'ammoniaque est « argilo-limoneuse » (fig. 1 —

point R), tandis que celle résultant de l'utilisation de l'hexamétaphosphate est « limono-argileuse » (fig. 1 — point Q) (1).

C'est donc incontestablement l'ammoniaque qui apparaît ici comme le dispersant le plus énergique. Mais est-il, lui-même, suffisamment énergique ? C'est ce que

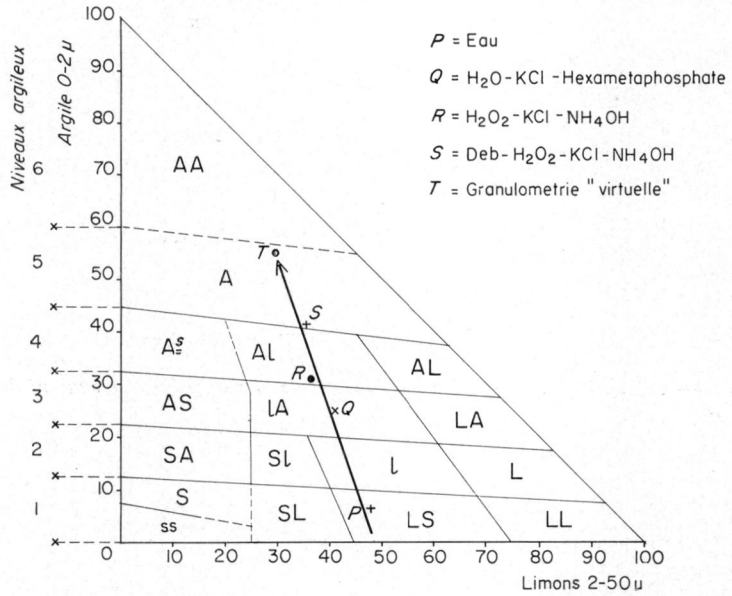


FIG. 1. — *Indications texturales d'après le diagramme de texture adopté au Laboratoire des Sols.*
AA : argile lourde, A : argile ou texture argileuse, LL : limon pur, L : limon, l : texture limoneuse, ss : sable, S : texture sableuse, A^s : texture argilo-sableuse lourde, AS : texture argilo-sableuse, SA : texture sablo-argileuse, Al : texture argilo-limoneuse, lA : texture limono-argileuse, AL : argile limoneuse, LA : limon argileux, LS : limon sableux, SL : sable limoneux, Sl : texture sablo-limoneuse.

nous avons essayé de contrôler en procédant à des déterminations minéralogiques sur les différentes fractions granulométriques récupérées lors de l'analyse effectuée avec la méthode à l'ammoniaque.

B — *Analyse minéralogique des diverses fractions*

Elle a été réalisée par l'intermédiaire des techniques habituelles : diffraction des rayons X, analyse thermique différentielle (fig. 2), thermogravimétrie (fig. 3).

Les spectres de rayons X permettent de montrer que la fraction argile ($\varnothing < 2\mu$)

(1) A titre de comparaison, on peut aussi indiquer, et bien que cela n'ait pas de sens physique précis, les résultats obtenus lors d'une analyse granulométrique effectuée après une simple trituration dans l'eau. *sans traitement préalable, ni dispersion* :

Fractions	< 2 µ	2-20 µ	20-50 µ	50-200 µ	0,2-2 mm	Total
Proportions.....	6,3	5,8	41,5	13,0	31,7	98,3

La notation texturale est alors du type « limon sableux » (fig. 1. Point P).

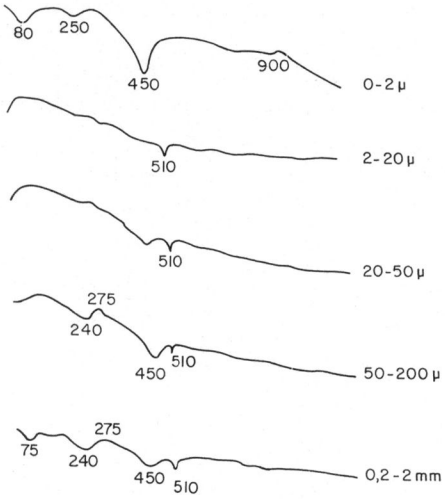


FIG. 2. — *Courbes d'analyse thermique différentielle des diverses fractions granulométriques.*

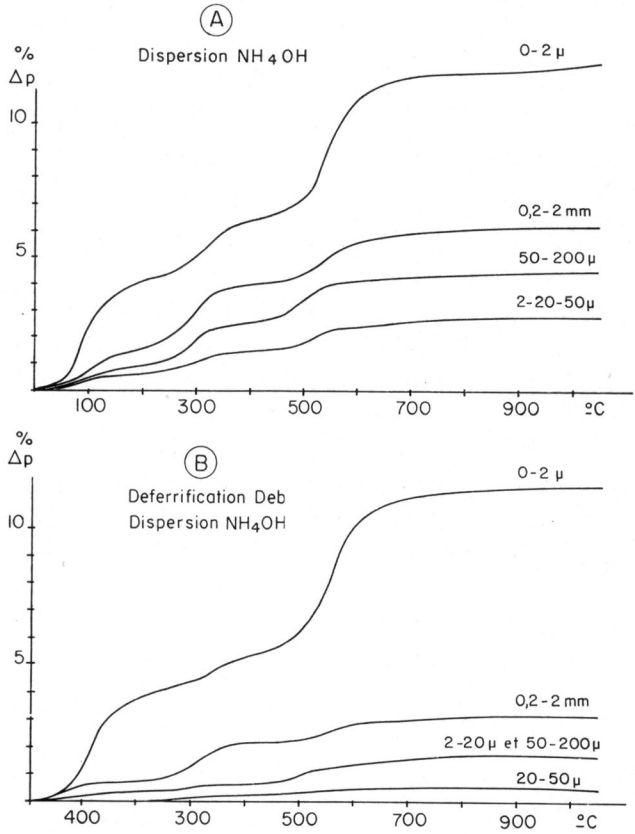


FIG. 3. — *Courbes thermogravimétriques des différentes fractions granulométriques.*

est essentiellement constituée par le mélange d'un minéral argileux 2/1, dioctaédrique et stable à 10 Å (type mica), que nous appellerons *illite* et d'un oxyhydroxyde de fer cristallisé, la *goethite* FeO_2H. Mais ces deux espèces minérales se retrouvent aussi dans *toutes* les autres fractions granulométriques : limons, sables fins et même sables grossiers, dont le constituant essentiel est toutefois le *quartz*.

Les méthodes thermiques confirment ces premiers résultats et permettent en outre, par l'intermédiaire des données thermopondérales (fig. 3-A), de réaliser une évaluation minéralogique quantitative. A cet effet, on attribue le domaine de perte de poids compris entre 225° à 425°, à la décomposition de la goethite et celui s'étalant de 425° à 725°, à la déshydroxylation de l'illite. On évalue alors la teneur correspondant aux deux minéraux dans chacune des fractions, en admettant que la goethite pure perd 10 p. 100 de son poids lors de la déshydratation et l'illite environ 6,8 p. 100. Enfin, le reste est exprimé sous forme de quartz (1).

On aboutit de cette façon aux résultats bruts consignés dans le tableau 2 ; mais on peut aussi ramener les différentes valeurs à 100 pour chacune des fractions (tabl. 3), ce qui conduit à une représentation imagée que l'on a reportée schématiquement dans la figure 4-A.

TABLEAU 2

Distribution des minéraux constitutifs dans les 5 classes granulométriques

Minéraux	0-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	0,2-2 mm	Total échantillon
Quartz (1)		18,7	10,0	7,1	8,8	44,6
Illite	23,7	4,4	2,1	3,0	5,4	38,6
Goethite	6,9	2,0	1,3	2,0	4,0	16,2
Total	30,6	25,1	13,4	12,1	18,2	99,4

(1) Y compris un très faible pourcentage de silicates primaires.

TABLEAU 3

Composition minéralogique centésimale de chaque fraction granulométrique

Minéraux	0-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	0,2-2 mm
Quartz	—	74,4	74,7	58,8	48,6
Illite	77,5	17,6	15,5	24,7	29,3
Goethite	22,5	8,0	9,8	16,5	22,1
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Somme des minéraux secondaires	100,0	25,6	25,3	41,2	51,4

(1) Naturellement, il aurait été possible d'établir une composition minéralogique plus élaborée, si l'on avait couplé les données thermopondérales relatives aux différentes fractions granulométriques avec les résultats de leurs analyses chimiques globales.

C — *Discussion des résultats*

L'étude minéralogique complète, telle qu'elle vient d'être réalisée, permet d'affirmer que la dispersion à l'ammoniaque effectuée dans les conditions normales n'a pas, dans le cas de cet échantillon, provoqué une libération totale des particules élémentaires.

On peut noter, en effet, que :

— la fraction « argile » ($\varnothing < 2\ \mu$) ne réunit que 56 p. 100 des minéraux secondaires (61,5 p. 100 de l'illite et 42,5 p. 100 de la goethite) ;

— la fraction « sable grossier » contient *plus* de minéraux secondaires (51,4 p.100) que d'espèces résistantes (48,6 p. 100) ;

— enfin, le pourcentage de goethite est sensiblement *le même* dans la fraction fine (22,5 p. 100) et dans la fraction la plus grossière du matériel (22,1 p. 100).

La technique analytique utilisée au cours de cette première phase d'étude, ne conduit donc qu'à une granulométrie « apparente » qui s'avère très insuffisante et même trompeuse si l'on veut s'en servir dans l'interprétation des phénomènes d'altération et d'évolution géochimique (1). Toutefois, en partant des données minéralogiques précédemment établies et si l'on admet que les espèces de néogenèse sont généralement submicroscopiques ($\varnothing < 2\ \mu$), il est possible de corriger un tel résultat et d'évaluer ainsi ce que l'on peut désigner sous le nom de *granulométrie virtuelle* de l'échantillon ; il s'agit de la véritable granulométrie élémentaire du matériau envisagé, mais celle-ci est considérée comme virtuelle simplement parce qu'elle est très difficile à atteindre analytiquement en suivant les techniques de dispersion habituelles. Pour l'horizon hydromorphe du Gers par exemple, le calcul effectué à partir des valeurs consignées dans les tableaux 1 et 2 conduit naturellement à un résultat fort différent de celui fourni par l'analyse directe à l'ammoniaque (tabl. 4), puisque la texture est nettement « argileuse » (fig. 1 — point T).

TABLEAU 4

Granulométrie « virtuelle » *de l'échantillon du Gers*

Fractions	0-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	0,2-2 mm	Total
Granulométrie « virtuelle »	54,8	18,7	10,0	7,1	8,8	99,4
Composition minéralogique des fractions en valeur relative p. 100	71 illite 29 gœthite	100 quartz	100 quartz	100 quartz	100 quartz	44,8 quartz 38,6 illite 16,2 goethite

Or, le désaccord entre la granulométrie « virtuelle » et la granulométrie apparente ne peut résulter, en dernière analyse, que de l'existence au sein de l'échantillon, d'un certain nombre d'agrégats qui ont parfaitement résisté au traitement dispersant et

(1) Elle est, par contre, tout à fait valable pour tester le comportement physique, hydrique et mécanique des mêmes formations.

qui se comportent de la sorte comme des « pseudo-particules élémentaires ».

Dans un cas de ce genre, il est naturel d'attribuer une telle stabilité à la présence des hydrates de fer qui jouent le rôle de ciment. C'est la raison pour laquelle, au cours d'une deuxième phase de l'étude, nous avons essayé d'obtenir une dispersion *plus* complète des minéraux argileux en procédant à une déferrification de l'échantillon avant de soumettre celui-ci à l'analyse granulométrique.

III. — ESSAI D'UTILISATION DES TECHNIQUES DE DÉFERRIFICATION DANS L'ÉTUDE DES PROBLÈMES GRANULOMÉTRIQUES — INTÉRÊT ET LIMITES

A — *Méthode de déferrification*

Les méthodes d'extraction du fer « libre » ont pour but de faire passer en solution les ions Fe de l'échantillon qui ne sont pas intégrés dans des réseaux silicatés primaires ou secondaires, c'est-à-dire essentiellement ceux appartenant aux oxydes et hydrates métalliques. En réalité, aucune des techniques préconisées habituellement dans les laboratoires de Pédologie ne répond parfaitement au but proposé (cf. O. ROBICHET, 1957 ; P. SEGALEN, 1964 ; *passim*).

Dans ces conditions, il ne reste donc qu'à choisir l'une d'entre elles (celle qui apparaît la plus appropriée) et à l'appliquer au matériel étudié, afin de voir si, effectivement, elle peut conduire à la libération des édifices argileux contenus dans les fractions supérieures à 2 μ de l'échantillon.

***

La technique retenue ici est celle de DEB (1950) modifiée par O. ROBICHET (1957). Un échantillon de 10 g de terre est placé dans un tube à centrifugeuse avec 200 ml d'eau permutée et porté au bain-marie à 40°C. On y ajoute 20 g d'hydrosulfite de sodium (pour réduire le fer ferrique) et on agite constamment sur le bain-marie pendant 30 minutes. Puis, on centrifuge pour séparer le culot que l'on reprend par une solution d'HCl N/20 à 40°C pendant 20 mn (dissolution des sulfures formés). On fait ensuite une nouvelle réduction à l'hydrosulfite et une seconde solubilisation à HCl N/20. Le résidu de la déferrification subit finalement une série de lavages alternés avec des centrifugations (R. BETREMIEUX, 1948) :

— 2 fois avec de l'alcool éthylique à 95° saturé en chlorure de sodium pour déshydrater l'échantillon.

— 3 fois avec un mélange de sulfure de carbone (1 partie) et d'alcool méthylique à 95° saturé en NaCl (2 parties) pour dissoudre le soufre.

— 2 fois avec de l'alcool méthylique à 95° saturé en NaCl pour éliminer l'excès de sulfure de carbone.

— enfin, 2 fois avec de l'eau alcoolique à 10 p. 100.

L'échantillon est alors prêt pour être soumis à la préparation habituelle : destruction de la matière organique (traitement H_2O_2) et dispersion (utilisation de l'ammoniaque dans ce travail).

B — *Expression des résultats et discussion*

Les données de l'étude granulométrique après déferrification sont reportées dans le tableau 5 et indiquées également sur la figure 1 (point S).

En outre, la comparaison avec les résultats précédents, expérimentaux ou théoriques, est reproduite sous la forme d'un tableau récapitulatif (tabl. 6).

Sur le plan minéralogique, les évaluations ont été effectuées à partir des courbes thermopondérales (fig. 3-B) et en suivant la méthode exposée antérieurement (tabl. 7 et 8) ; d'où la représentation schématique indiquée dans la figure 4-B.

En se référant à ces différents éléments, il devient alors très aisé de constater que la déferrification modifie notablement la distribution granulométrique ; elle provoque, en effet, une augmentation substantielle de la fraction fine ($\varnothing < 2\ \mu$) et une diminution très importante des fractions sableuses, en particulier des sables grossiers qui passent ainsi en valeur absolue de 18,2 à 5,7 p. 100, soit une perte de près de 70 p. 100 (68,6 p. 100). Ce dernier fait a d'ailleurs été vérifié en effectuant

TABLEAU 5

Constitution granulométrique de l'échantillon déferrifié

Dispersion NH_4OH	0-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	0,2-2 mm	Total
Échantil. naturel (%)	37,8	27,4	13,1	7,4	5,7	91,4
Échantil. déferrifié (%)	41,2	30,0	14,3	8,1	6l4	a00,0

TABLEAU 6

Granulométries comparées

Méthodes	0-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	0,2-2 mm	Total
Granulométrie courante (NH_4OH)	30,6	25,1	13,4	12,1	18,2	99,4
Granulométrie après déferrification	41,2	30,0	14,3	8,1	6,4	100,0
Granulométrie « virtuelle »	54,8	18,7	10,0	7,1	8,8	99,4

TABLEAU 7

Répartition des minéraux de l'échantillon déferrifié dans les différentes classes granulométriques

Minéraux	0-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	0,2-2 mm	Échantillon total
Quartz		22,7	12,1	6,2	4,2	45,2
Illite	32,1	3,8	0,7	0,8	0,8	38,2
Goethite	5,7	0,9	0,3	0,4	0,7	8,0
Total.....	37,8	27,4	13,1	7,4	5,7	91,4

TABLEAU 8

Composition minéralogique centésimale de chaque fraction séparée sur échantillon déferrifié

Minéraux	0-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	0,2-2 mm
Quartz.....		82,9	92,3	83,9	73,8
Illite	85	14,0	5,3	10,5	13,3
Goethite	15	3,1	2,4	5,6	12,9
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Somme des minér. sec. ..	100,0	17,1	7,7	16,1	26,2

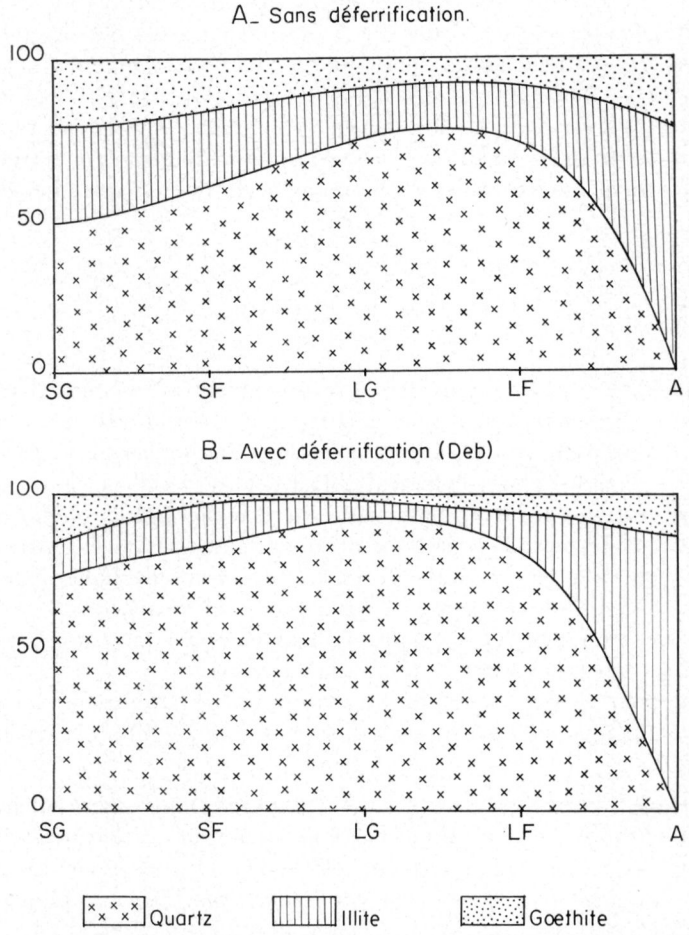


FIG. 4. — *Spectres minéralogiques de la constitution granulométrique, avant et après déferrification* DEB.
A : argile (< 2μ), LF : limon fin (2-20μ), LG : limon grossier (20-50μ),
SF : sable fin (50-200μ), SG : sable grossier (0,2-2 mm).

une déferrification des sables grossiers du même échantillon récupérés lors de l'analyse classique à l'ammoniaque (cf. § I) ; l'ordre de grandeur obtenu est le même, puisque 72,3 p. 100 des sables avaient disparu à l'issue du traitement.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donc nettement améliorés en procédant à une déferrification préalable. Néanmoins, dans le cas de l'échantillon étudié ici, où tous les ciments ferrugineux sont à l'état d'un monohydrate *cristallisé*, la dispersion obtenue est loin d'être totale. 51 p. 100 seulement de la goethite du matériel ont été solubilisés par le traitement ; aussi la fraction argile ne contient-elle que 82 p. 100 de l'ensemble des minéraux secondaires et 84 p. 100 de l'illite [1]. Le procédé DEB a donc finalement épargné un certain nombre de « pseudo-particules », en sorte que la détermination de la composition élémentaire de l'échantillon du Gers ne peut réellement être obtenue que par la méthode de la granulométrie « virtuelle », c'est-à-dire par évaluation à partir de données minéralogiques quantitatives (cf. ci-dessus).

Il faut noter toutefois que, dans d'autres cas, la déferrification peut conduire à des résultats plus complets. C'est ce qui se produit par exemple lorsque les ciments ferrugineux sont essentiellement à l'état *amorphe* ; il ressort, en effet, des travaux de B. D. MITCHELL et R. C. MACKENZIE (1954), O. ROBICHET (1957) que la solubilisation des hydrates ferriques est alors à peu près totale. Il est donc raisonnable de penser que, dans de telles conditions, la composition élémentaire pourrait être parfaitement déterminée à partir des *seules* données de l'étude granulométrique.

IV. — CONCLUSIONS

Le principal résultat de ce travail, qui corespond en réalité à une analyse critique du processus de dispersion, est d'avoir montré que, dans l'étude des sols et surtout des horizons d'altération, il pouvait être fructueux d'appliquer les méthodes d'investigations minéralogiques, non seulement à la fraction « argile », ce qui constitue en somme une opération classique, mais aussi *aux autres fractions granulométriques*.

On a vu, en effet, que l'étude minéralogique était particulièrement adaptée :

— pour contrôler les résultats de l'analyse granulométrique et, par voie de conséquence, pour tester l'efficacité de la méthode de dispersion ;

— pour mettre en évidence éventuellement des « pseudo-particules » et déterminer en même temps leur composition minéralogique ;

— enfin, pour corriger les données analytiques et établir, par l'intermédiaire du bilan minéralogique, ce qu'on a désigné sous le nom de granulométrie « virtuelle » de l'échantillon.

Le couplage *systématique* des données granulométriques et minéralogiques a donc conduit à la mise au point d'un « mode d'évaluation » de la composition *élémentaire*, qui est spécialement indiqué pour l'étude des horizons riches en constituants ferrugineux *cristallisés* (oxydes et oxyhydroxydes), mais qui s'applique néanmoins

[1] La méthode DEB ayant avant tout une action de surface, il est à peu près certain que la dispersion obtenue aurait pu être meilleure, si le traitement avait été répété plus de deux fois.

à n'importe quel matériau superficiel, quelles que soient son origine, sa constitution générale et la nature du ciment qui le caractérise. Il n'en demeure pas moins qu'une telle approche ne doit jamais dispenser d'utiliser les techniques *analytiques* que paraissent les plus appropriées à l'étude de chacun des cas pouvant se présenter dans le milieu naturel ; c'est ainsi que pour le matériel envisagé au cours de ce travail, les traitements de déferrification ont sensiblement amélioré les résultats obtenus par l'intermédiaire des méthodes conventionnelles et ont permis, en définitive, de récupérer le *maximum* de minéraux secondaires et en particulier d'espèces argileuses au sein de la fraction la plus fine ($\varnothing < 2\ \mu$) de l'échantillon.

Recu pour publication en janvier 1967.

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE SIZE DISTRIBUTION AND THE MINERALOGICAL COMPOSITION OF SOILS AND WEATHERED HORIZONS

Mineralogical study, when systematically applied to the various granulometric fractions of a hydromorphic horizon, shows that, on instancing specimens high in ferric hydrates, the dispersion, achieved by means of conventional methods [H_2O_2—KCl—NH_4OH] or [H_2O_2—KCl—hexametaphosphate] is not adequate, the mechanical composition so derived being practically meaningless. This can be improved by applying, prior to the analysis, an iron-removing process (DEB). However, if a true particle-size distribution within the specimen is required, this calls for a fully scrutinized mineralogical examination of all granulometric fractions. In this way, defining a size distribution, having a real meaning with regard to the phenomena of geochemical and mineralogical development, is arrived at. Such a mechanical composition has been termed « virtual size distribution » because, nearly always, this is practically unfeasible on the basis of purely analytical procedures.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER BEZIEHUNGEN ZWISCHEN KÖRNCHENGRÖSSE UND DER MINERALOGISCHEN BESCHAFFENHEIT DER BÖDEN UND DER VERWITTERUNGSSCHICHTEN

Die für die verschiedenen Körnchen-Fraktionen einer hydromorphen Schicht systematisch angewandte mineralogische Untersuchung zeigt, dass im Falle von ferrihydrat-reichen Bodenproben, die durch konventionelle Methoden [H_2O_2—KCl—NH_4OH] oder [H_2O_2—KCl—Hexametaphosphate] durchgeführte Dispersion, ungenügend ist. Die erzielte Körnchengrössenbestimmung hat danach keine bestimmte Definition. Durch Anwendung einer Eisen entfernenden Behandlung (DEB) vor der Analyse, können die Ergebnisse verbessert werden. Will man jedoch eine Körnchengrösseverteilung erhalten, die die Verteilung der Elementarteilchen im Innern einer Bodenprobe genau wiedergibt, so ist es notwendig jede normale Untersuchung des Körnchenzustandes durch eine eingehende mineralogische Untersuchung der verschiedenen Fraktionen zu ergänzen. Es ist dann möglich. einen « Körnchengrössenzustand » zu schätzen und zu bestimmen, der, auf dem Gebiet der geochemischen und mineralogischen Entwicklungserscheinungen, eine präzise Bedeutung hat. Dieser

Zustand wurde als « Virtueller Körnchenzustand » berzeichnet. da es sehr oft unmöglich ist, ihn allein mit analystischen. technischen Verfahren zu bestimmen.

Сравнительное изучение гранулометрического и минералогического составов горизонта.

А. БЛО, Г. ПЭДРО.

РЕЗЮМЕ

Систематическое изучение минералогического состава различных гранулометрических фракций гидроморфного горизонта, показывает, что в случаях, когда проба содержит крупные количества гидратов железа, дисперсия получаемая с помощью обычных методов (H_2O_2 — KCl — NH_4OH), или H_2O_2 — KCl — Гексаметафосфат), является недостаточной, создавая условия при которых проведение гранулометрии не будет иметь никакого определенного смысла. Применение железо-удаляющей обработки перед анализом несколько улучшает результаты. Но, если требуется получить гранулометрическое распределение точно отражающее расположение частичек элементов внутри пробы, является необходимость, добавить ко всякому нормальному гранулометрическому изучению, еще и детальное минералогическое исследование отдельных фракций. Таким образом возможно оценить и определить некоторое « гранулометрическое состояние » имеющее определенное и точное значение в плане геохимической и минералогической эволюций; состояние это получило наименование « виртуальной гранулометрии », так как очень часто, почти-что не бывает возможности его выявить при помощи одних только аналитических приемов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BETREMIEUX R. 1948. Sols. in A. BRUNEL. *Traité pratique de Chimie végétale.* Tome 2, p. 342.

BETREMIEUX R., 1963. *Diagramme de texture* (Laboratoire des Sols). Ronéo 3 p.

DEB B. C., 1950. Estimation of free iron oxides in soils and clays and their removal. *J. Soil Sci.*, **1**, 212-220.

MITCHELL B. D., MACKENZIE R. C.,1954. Removal of free monoxide from clays. *Soil Sci.*, **77**, 173-183.

ROBICHET O., 1957. Recherches sur les oxydes de fer et de manganèse dans les sols. *Ann. agron.*, 511-572.

SEGALEN P., 1964. *Le fer dans les sols*, 150 p. O. R. S. T. O. M., Paris.

VAN WAMBEKE A., 1959. Le rapport Limon/Argile, mesure approximative du stade d'altération des matériaux originels des sols tropicaux. *IIIe Conf. interaf. Sols. Dalaba*, **1**, 161-167.

Ann. agron., 1967, **18** (2), 217-236.

MISE AU POINT BIBLIOGRAPHIQUE

LA DIFFUSION DANS LES SYSTÈMES ARGILE-EAU

I. — RAPPELS THÉORIQUES CONCERNANT LES PHÉNOMÈNES DE DIFFUSION

R. CALVET

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles

SOMMAIRE

L'étude théorique des phénomènes de diffusion concerne en premier lieu la résolution des équations de diffusion. Le coefficient de diffusion déterminé expérimentalement est un coefficient global dont la signification dépend des propriétés du milieu. La considération des défauts de réseau jointe à la théorie des vitesses absolues de réaction permet de décrire des mécanismes élémentaires de diffusion.

INTRODUCTION

Par suite de l'agitation thermique, les molécules, les atomes et les ions d'une substance effectuent des mouvements au hasard. Dans un système en équilibre thermodynamique, l'effet résultant de ces mouvements est nul, et il est donc impossible de les mettre en évidence sans intervenir sur le système.

On peut intervenir de deux façons :

— soit en créant une hétérogénéité de distribution par rapport à la particule migrante et en suivant l'évolution vers l'homogénéité ;

— soit en appliquant, par exemple, un champ de force électrique qui fait passer le système d'un état initialement homogène à un état finalement hétérogène (par rapport à la particule migrante).

Dans les deux cas, l'expérience permet de mettre en évidence un flux, qui apparaît comme proportionnel à la force qui en est la cause.

Dans le cas où le système possède des zones de concentrations différentes, la force est le gradient de concentration de la particule qui se déplace. La relation entre le flux et la force s'écrit alors :

$$\vec{J} = D \overrightarrow{\text{grad}}\, C \qquad (1)$$

D est le coefficient de diffusion. Cette relation ne fait aucune hypothèse quant aux mécanismes de diffusion. C'est seulement une relation phénoménologique.

L'exposé qui va suivre est un rappel sommaire de quelques résultats théoriques qui concernent d'une part, le formalisme mathématique inhérent à la résolution de l'équation différentielle (1), et d'autre part, la discussion des paramètres physiques qui interviennent dans l'expression de D. Un second exposé sera consacré à une revue bibliographique des résultats expérimentaux récents relatifs à la diffusion des cations dans les systèmes argile-eau.

I. — ASPECT PHÉNOMÉNOLOGIQUE DE LA DIFFUSION

A — *Les relations de Fick*

1. *Milieu isotrope.*

Soit un système constitué par deux milieux A et B séparés par une interface I plane et bien définie, qui ne diffèrent entre eux que par la concentration d'un soluté S (fig. 1). On aura par exemple : $C_S^A > C_S^B$. Il existe alors un gradient de concentration $\frac{dC}{dx}$ dirigé perpendiculairement à l'interface

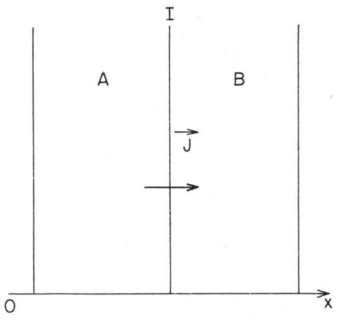


FIG. 1. — *Direction du flux* $\vec{J}$ *quand* $C_S^A > C_S^B$

(suivant *ox*) et le soluté S va diffuser de A en B. Le flux $J_{A \rightarrow B}$ est relié au gradient de concentration par la formule :

$$J = - D \frac{dC}{dx} \qquad (2)$$

(2) est la première relation de Fick.

Le signe (—) provient du fait que la concentration C décroît dans le sens des x positifs.

D : coefficient de diffusion.

Pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté quant à la signification de la formule (2), il faut définir :

1° le système de coordonnées utilisé (une discussion détaillée des systèmes de référence a été donnée par J. CRANK (1949).

2° le gradient de concentration : direction et intensité.

3° le flux : direction et intensité.

4° les unités employées.

L'équation aux dimensions de D est la suivante :

$$J = D \frac{dC}{dx}$$

$$ML^{-2}T^{-1} = D \cdot ML^{-3}L^{-1}$$

d'où :

$$D = L^2T^{-1}$$

Exemple : si les dimensions du système sont exprimées en centimètres, et le temps en secondes, D s'exprime en centimètres carrés par seconde : cm^2sec^{-1}.

La notation vectorielle permet d'écrire la relation (2) indépendamment du système de coordonnées :

$$\vec{J} = - D \overrightarrow{\text{grad}}\, C \qquad (3)$$

En un point d'un milieu, où se produit une diffusion, la concentration en substance diffusante varie avec le temps. La variation de concentration par rapport au temps est donnée par la deuxième relation de Fick.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{4}$$

Si le milieu est repéré par trois axes de coordonnées *ox*, *oy*, *oz* et que la diffusion a lieu dans les trois directions *ox*, *oy*, *oz*, la relation (4) s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\Delta C \tag{5}$$

avec :

$$\Delta C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

soit en notation vectorielle :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \text{ div } (\overrightarrow{\text{grad}}\ C) \tag{6}$$

Les relations (4), (5) et (6) supposent que D est constant.
Pour D variable. l'expression générale s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div } (D \overrightarrow{\text{grad}}\ C) \tag{7}$$

2. *Milieu anisotrope.*

Dans un tel milieu, les propriétés physiques et chimiques sont différentes suivant les directions de l'espace par rapport auxquelles on les définit. Pour un système repéré par les trois axes de coordonnées *ox*, *oy* et *oz*, le coefficient de diffusion n'a pas la même valeur selon celle des directions *ox*, *oy* et *oz* que l'on considère. Dans le cas le plus général, les composantes J_x, J_y, et J_z du flux total J s'écrivent de la façon suivante :

$$J_x = - D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} - D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \tag{8}$$

$$J_y = - D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} - D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \tag{8}$$

$$J_z = - D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} - D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} - D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \tag{8}$$

$- D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x}$: flux dans la direction *ox* dû au gradient $\frac{\partial C}{\partial x}$

$- D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y}$: flux dans la direction *ox* dû au gradient $\frac{\partial C}{\partial y}$ etc.

Le flux total $\vec{J}$ s'écrit : $\vec{J} = \vec{i} J_x + \vec{j} J_y + \vec{k} J_z$.
où $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ sont les vecteurs unités correspondants aux axes *ox*, *oy* et *oz*.

Quand $\vec{J}$ s'exprime au moyen des relations (8), on dit que le coefficient de diffusion D se caractérise par le tenseur

$$\begin{matrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{matrix}$$

Si les axes de coordonnées correspondent aux axes principaux de diffusion, il est possible de montrer (voir W., JOST 1960) que les termes tels que $-D_{xy}\frac{\partial C}{\partial y}$, ne contribuent pas à la variation de concentration. Dès lors, les composantes J_x, J_y et J_z deviennent :

$$J_x = -D_{xx}\frac{\partial C}{\partial x}$$

$$J_y = -D_{yy}\frac{\partial C}{\partial y}$$

$$J_z = -D_{zz}\frac{\partial C}{\partial z}$$

Pour chacune des trois directions *ox*, *oy*, *oz*, le formalisme est alors le même que pour un milieu isotrope.

B — *Approche expérimentale*

Nous avons vu que la relation la plus générale s'écrivait :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}\,(D\ \overrightarrow{\text{grad}}\ C)$$

La résolution d'une telle équation n'est généralement pas possible. En pratique, les hypothèses simplificatrices suivantes sont presque toujours utilisées :

le milieu est isotrope
le coefficient D est constant

Il est possible d'effectuer deux types d'expériences suivant la valeur de $\frac{\partial C}{\partial t}$:

$\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ Régime permanent

$\frac{\partial C}{\partial t} \neq 0$ Régime transitoire

1. *Mesures en régime permanent.*

La condition $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ entraîne $\frac{\partial C}{\partial x} =$ constante.

Le flux a pour expression : $\vec{J} = -D\ \overrightarrow{\text{grad}}\ C$. L'expérience consiste donc à mesurer le flux et le gradient de concentration lorsqu'ils sont indépendants du temps. Cette méthode est fréquemment employée pour les mesures de diffusion à travers les membranes. Elle est d'une application difficile quand l'état stationnaire s'établit lentement.

2. *Mesure en régime transitoire.*

Pour un phénomène monodimensionnel, l'équation de diffusion s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Plusieurs procédés sont utilisables pour résoudre cette équation (voir J. CRANK, 1964). Ils nécessitent tous la connaissance des conditions aux limites, c'est-à-dire les valeurs de la concentration en substance diffusante pour :

$$x = 0 \text{ et } t = 0$$

On n'examinera que deux cas fréquemment utilisés :

— Source mince.
— Source dont l'épaisseur peut être considérée comme infinie.

a) *Source infiniment mince.*

Soit un milieu de diffusion (que nous supposerons parallélépipédique par exemple) repéré par trois axes de coordonnées *ox*, *oy* et *oz*. La source, infiniment mince, coïncide avec le plan *oyz* (fig. 2).

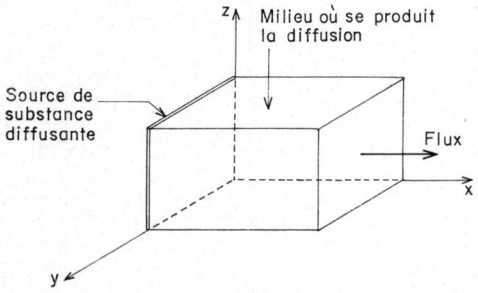


FIG 2. — *Source infiniment mince*

On suppose que la diffusion se fait suivant la direction *ox*, et qu'il n'y a pas de diffusion de surface dans le plan *oxy*. Cette dernière condition revient à admettre que la substance diffusante est uniformément répartie dans le plan *oxy*.

La quantité M déposée dans le plan $x = 0$ au temps $t = 0$ et la concentration C (x, t) à la distance x au temps t sont reliées par la formule :

$$C(x, t) = \frac{M}{2\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \tag{9}$$

L'expérience consiste à mesurer C (x, t) pour un temps t donné.

La formule (9) n'est théoriquement applicable que si le milieu étudié est infini. En fait, on admet que cette condition est réalisée pour un milieu de dimension finie (longueur l), si la quantité de substance qui a diffusé au-delà de l dans un milieu infini est négligeable devant M. En prenant arbitrairement une proportion de 1 p. 1 000, il faut résoudre l'équation en x' :

$$10^{-3} = \frac{\text{quantité qui a diffusé au-delà de } x'}{\text{quantité totale qui a diffusé}} = \frac{\int_{x'}^{\infty} C(x, t)\, dx}{\int_{0}^{\infty} C(x, t)\, dx}$$

$$10^{-3} = \frac{\int_{x'}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) dx}{\int_{0}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) dx}$$

La solution est $x' \simeq 4\sqrt{Dt}$ (P. G., SCHEWMON 1963).

Cette méthode est la plus simple. La validité en est soumise aux deux conditions suivantes :
— La source doit être infiniment mince.
— La longueur minimum du milieu étudié doit être de l'ordre de $4\sqrt{Dt}$.

b) *Source d'épaisseur infinie.*

L'expérience consiste à mettre en contact deux milieux I et II de formes et de propriétés identiques. L'un de ces milieux contient la substance dont on veut étudier la diffusion (traceur radioactif par exemple).

On suppose que la diffusion se fait selon l'axe *ox*. La figure 5 représente la courbe C (x, t) pour $t = o$ et $t > o$.

Co : concentration uniforme en substance diffusante contenue dans le bloc I.

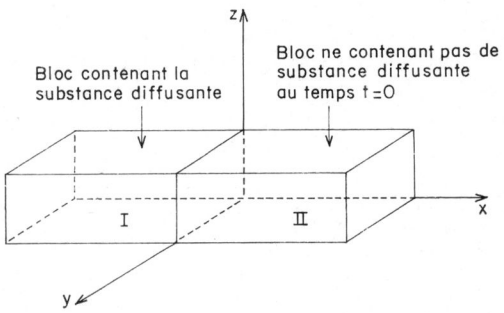


FIG. 3. — *Source d'épaisseur infinie*

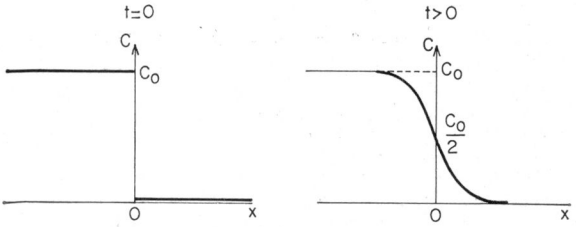


FIG. 4. — *Distribution de la concentration de la substance diffusante pour* $t = o$ *et* $t > o$

Dans ce cas, les conditions aux limites sont :

$$\left.\begin{array}{ll} x < o & C = Co \\ x > o & C = o \end{array}\right\} t = o$$

$$x = o \qquad C = \frac{Co}{2} \qquad t > o$$

La solution de l'équation $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ est (voir J. CRANCK., 1964).

$$C(x, t) = \frac{Co}{2} \operatorname{erf} c \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \qquad (10)$$

avec $$\operatorname{erf} c \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

erf z : fonction d'erreur définie par la relation :

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_o^z \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) dx$$

Comme dans le cas précédent, on suppose qu'il n'y a pas de diffusion suivant *oz* et *oy*. Ceci suppose que le contact entre les deux milieux soit parfait.

Pour des milieux de longueur finie l ; la mesure n'est valable que si les relations suivantes sont vérifiées :

$$\left.\begin{array}{ll} C = Co & x = -l \\ C = o & x = +l \end{array}\right\} \text{ pour } t > o$$

C — *Signification du coefficient de diffusion*

1. *Autre expression du flux.*

La première relation de Fick peut être considérée comme un résultat expérimental. Cependant, il est également possible de l'introduire d'un point de vue théorique. Elle apparaît alors comme une expression particulière d'une formulation plus générale donnée par la thermodynamique des processus irréversibles.

Dans le cas d'un système isolé où un constituant i n'est pas distribué uniformément, l'expression la plus générale de la force X_i qui agit sur la particule i est de la forme (voir DE GROOT., 1952) :

$$X_i = - \text{grad } \mu_i \tag{11}$$

à température constante.

μ_i est le potentiel chimique du constituant i.

A cette force, correspond un flux J_i dont l'expression phénoménologique s'écrit :

$$J_i = \alpha_i X_i \tag{12}$$

Le coefficient α_i a les dimensions d'un temps divisé par un volume ($L^{-3}T$).

μ_i^0 étant de la forme $\mu + RT \text{ Log } C_i$, on peut, après dérivation écrire l'équation (11) de la façon suivante :

$$J_i = - \alpha_i RT \cdot \frac{1}{C_i} \text{ grad } C_i \tag{13}$$

$RT \cdot \frac{1}{C_i}$ a les dimensions d'une énergie divisée par une concentration, soit L^5T^{-2}. Le facteur de (grad C_i) a donc pour dimensions :

$$[\alpha_i] \times [L^5T^{-2}] = [L^{-3}T^{+1}] \times [L^5T^{-2}] = L^2T^{-1}$$

conformément à ce qui avait été établi à propos de la loi de Fick.

2. *Coefficient de diffusion mutuelle et coefficient d'autodiffusion.*

Dans un système où les particules de plusieurs constituants peuvent se déplacer, les flux correspondants, donc les coefficients de diffusion ne sont pas indépendants. Soit, par exemple, un milieu où deux composés A et B sont susceptibles de se déplacer. Le coefficient de diffusion de A dépend de la présence de B et est noté DAB. Il est appelé coefficient de diffusion mutuelle. Un cas précis sera étudié au sujet de la diffusion des particules chargées.

Le traitement théorique complet de la diffusion simultanée de plusieurs composés, consiste à développer les relations du type (12) (voir par exemple A. B., LILIARD 1964).

Le coefficient d'autodiffusion qui n'est défini que dans le cas où une seule catégorie de particules est susceptible de se déplacer, n'est en toute rigueur, jamais accessible. Il est cependant très utile de le connaître afin de caractériser les interactions entre particules et milieu non perturbé. On peut en obtenir une valeur suffisamment approchée dans la majorité des cas grâce à l'emploi de traceurs radioactifs. Ces derniers, ajoutés au système en quantités infinitésimales (utilisation du traceur sans entraîneur) on peut admettre qu'aucun gradient de concentration n'est créé à cet effet. Dans la mesure où les masses des deux isotopes sont peu différentes, il est possible de considérer que les mobilités sont identiques (la mobilité est une fonction de $1/\sqrt{M}$; cette approximation est justifiée, sauf pour les éléments très légers).

Dans ces conditions, l'étude du déplacement des molécules, atomes ou ions marqués permet de déterminer une valeur du coefficient d'autodiffusion. Les deux dispositifs expérimentaux précédemment décrits peuvent être utilisés. Le traceur est ajouté, soit sous forme d'une couche mince (§ B-2-*a*), soit dans une source épaisse (§ B-2-*b*). Les formules (9) et (10) sont toujours valables. Il suffit de les appliquer aux radioactivités mesurées.

3. *Le coefficient de diffusion est un coefficient global.*

L'expérience donne un coefficient, et on sait déjà que celui-ci peut éventuellement tenir compte de la présence de différentes particules susceptibles de diffuser. De plus, la valeur de ce coefficient peut dépendre :

— de la concentration de la substance diffusante dans le milieu.
— de la participation de cette substance à une réaction chimique.
— de propriétés particulières du milieu.

a) *Influence de la concentration.*

Étant donné que D dépend de la concentration, il dépend également des coordonnées d'espace. L'équation de diffusion doit s'écrire :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div} (D \overrightarrow{\text{grad}} C)$$

Différentes méthodes de calcul sont utilisables. La plus généralement employée est la méthode de *Boltzmann-Matano,* (J. CRANK, 1964). Les dispositifs expérimentaux déjà décrits peuvent toujours être utilisés, mais les formules (9) et (10) ne sont plus valables.

b) *La substance diffusante participe à des réactions chimiques.*

(Le cas où la substance diffusante est adsorbée par un constituant du milieu relève d'un formalisme identique).

Si le composé dont on étudie la diffusion réagit avec le milieu pour donner des produits plus ou moins diffusibles, on conçoit que le coefficient de diffusion déterminé lors de l'expérience, ne représente pas l'aptitude du composé à se déplacer dans un milieu sans interactions. Le coefficient global peut être suffisant, mais il peut également être utile de faire apparaître le coefficient de diffusion caractéristique du système en l'absence de réaction chimique.

La complexité du problème dépend évidemment du type de la réaction (voir J. CRANK, 1964, p. 121). A titre d'exemple, considérons le cas où la réaction donne un produit non diffusible. Soient C la concentration de la substance qui diffuse, et S la quantité de composé non diffusible qui se forme. Si on suppose qu'une relation simple du type :

$$C = RS \ (R = \text{constante})$$

est valable, l'équation de diffusion doit s'écrire :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D'}{1 + R} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

(cas d'une diffusion monodimensionnelle)

D' : coefficient de diffusion que l'on aurait déterminé s'il n'y avait pas de réaction chimique.

c) *Autres propriétés du milieu.*

Il faut tenir compte des propriétés qui apparaissent quand le milieu a une structure discontinue (suspension-poudre). Les aspects théoriques et pratiques de ce problème seront envisagés ultérieurement.

La connaissance des caractéristiques du déplacement d'un composé donné dans un milieu perturbé constitue un résultat. Cependant, il est utile d'exprimer le coefficient global en fonction du coefficient d'autodiffusion. Celui ci est directement lié aux propriétés des particules qui diffusent et aux propriétés du milieu non perturbé. A ce niveau de l'analyse, le phénomène de diffusion permet de décrire des mécanismes élémentaires qui constituent l'aspect microscopique du phénomène.

II. — ASPECT MICROSCOPIQUE DU PHÉNOMÈNE DE DIFFUSION

L'étude du déplacement d'une particule nécessite la connaissance :

1° de la topographie du milieu, c'est-à-dire les points de départ, les points d'arrivée et les chemins qui les relient.

2° La façon dont les particules parcourent ces chemins.

En ce qui concerne les solides dont nous parlerons dans ce chapitre, les défauts de réseau permettent de définir la topographie du milieu. La théorie du déplacement au hasard, et la théorie des vitesses absolues de réaction donnent une image de la façon dont les particules se déplacent.

A — *Possibilités de déplacement des particules*

C'est la théorie physique des solides qui a permis de décrire les différents types de mécanismes caractérisant le déplacement des particules lors d'un phénomène de diffusion. Ces mécanismes ne concernent actuellement que les cristaux. Ils résultent de l'existence d'imperfections cristallographiques ou défauts de réseau.

1. *Les défauts de réseau : aspect qualitatif.*

Les imperfections cristallographiques se classent en trois catégories :
— Imperfections particulaires normales (Ex. : électrons ⊖, trous ⊕).
— Imperfections particulaires parasites (Ex. : particules α, neutrons).
— Imperfections particulaires cristallographiques.

Ce sont ces dernières qui jouent un rôle dans les phénomènes de diffusion. Elles ont trois origines distinctes :
— Défauts physiques de *Frenkel* et *Schottky*.
— Défauts chimiques (impuretés).
— Dislocations du réseau.

Le schéma suivant illustre ce que sont les défauts physiques :

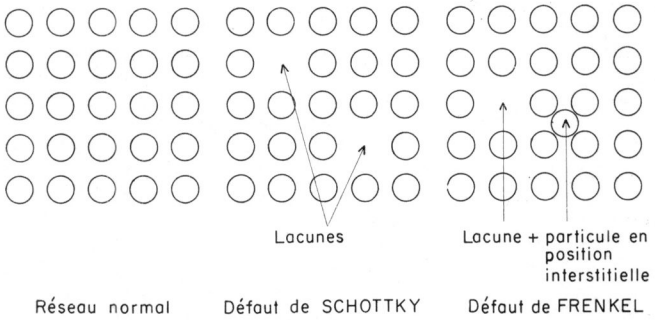


FIG. 5. — *Défauts physiques de Frenkel* et *Schottky*
Défauts de *Schottky* : Une position normale du réseau est inoccupée.
Défauts de *Frenkel* : Un atome quitte sa position normale dans le réseau pour occuper une position interstitielle.

Pour un cristal ionique ayant des défauts de *Schottky* il y a autant de lacunes d'anions que de lacunes de cations (conservation de l'électroneutralité).

Les défauts chimiques sont constitués par la présence d'impuretés ; Ex. : cristal de silicium contenant de l'arsenic, cristal de ClNa contenant du cadmium.

Tous ces défauts peuvent exister simultanément dans un même cristal. Leur étude fait appel à de nombreuses méthodes :

Méthodes électriques { mesures de conductivité ; effet HALL. ; spectroscopie hertzienne.
Méthodes optiques.
Mesures de diffusion.

Les points de départ et d'arrivée peuvent être des lacunes ou des sites interstitiels. Ceci est valable pour les réseaux cristallins. Les mécanismes de passage d'un site à un autre font intervenir ces positions privilégiées. Cependant, on conçoit que la particule ne rencontrera pas toujours un volume suffisant pour se déplacer sans contrainte. La figure 6 représente le déplacement d'une particule d'un site interstitiel à un autre.

L'état (2) est évidemment le moins stable. Il faut fournir de l'énergie à la particule pour vaincre la barrière de potentiel. Celle-ci est due aux :
— interactions coulombiennes (pour les ions surtout).

— distorsions du réseau.
— énergies de polarisation des atomes, des ions ou des molécules qui forment le réseau.
— interactions des dipôles induits avec les ions qui se déplacent.
— répulsions des nuages électroniques.

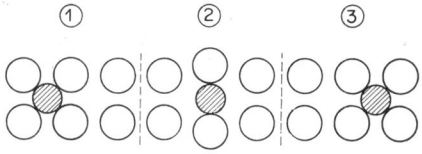


FIG. 6. — *Migration d'un atome d'un site interstitiel à un autre*

Les deux premiers effets sont les plus importants.

L'importance d'un phénomène de diffusion est conditionnée par le nombre de défauts de réseau. Ce nombre, encore appelé degré de désordre, dépend de la valeur de la barrière de potentiel. Les théories de *Frenkel* et *Schottky* permettent d'évaluer ce degré de désordre, à condition toutefois que celui-ci soit faible.

2. *Aspect quantitatif.*

a) *Théorie de Frenkel* (voir W. JOST, 1960, p. 95).

Frenkel envisage le passage d'une particule d'un site normal du réseau à une position interstitielle, et le mouvement inverse. Il pose que le nombre n_i de particules qui passent en position interstitielle est :

$$n_i = n_R \exp\left(-\frac{E + U}{RT}\right)$$

n_R : nombre de sites normaux du réseau ;
E : différence entre l'énergie (exprimée pour une molécule-gramme) d'un site interstitiel et d'un site normal.
U : barrière de potentiel additionnelle.
R : $k \cdot N$ k : constante de *Boltzman*.
N : Nombre d'*Avogadro*.
T : Température absolue.

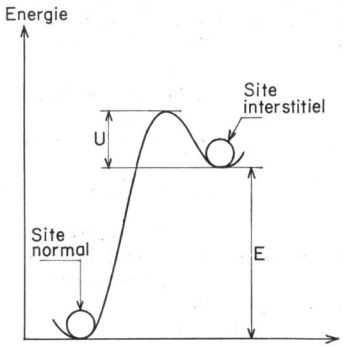


FIG. 7. — *Variation de l'énergie potentielle d'une particule lors du passage d'un site normal du réseau à un site interstitiel.*

De même, le nombre n_L d'atomes qui passent d'un site interstitiel à un site normal est

$$n_L = n_i \exp\left(-\frac{U}{RT}\right)$$

n_i : nombre de particules occupant un site interstitiel.

U, R et T ont les mêmes significations que précédemment.

Compte tenu des nombres n_i et n_L *Frenkel* calcule le degré de désordre. Il est possible de relier cette valeur aux résultats donnés par la diffusion et les mesures de conductivité électrolytique.

b) *Théorie de Schottky* et *Wagner* (voir W. JOST, 1960, p. 98).

Ces auteurs considèrent un problème plus général. Ils tiennent compte des lacunes, des sites interstitiels et de l'échange entre ces défauts pour calculer l'énergie libre d'un cristal désordonné. Cette théorie permet de calculer les concentrations en différents défauts.

c) *La théorie des mouvements au hasard.*

Dans un réseau, les particules ne peuvent se déplacer que s'il existe des sites privilégiés disponibles (dans un cristal, ce sont les défauts dont nous avons parlé). Quand la seule source d'énergie est d'origine thermique (sans gradient), il est possible de décrire le déplacement des particules par la théorie des mouvements au hasard (voir P. G. SHEWMON, 1963).

Le déplacement des particules est caractérisé par la distance y franchie à chaque saut et la fréquence Γ de ces sauts.

Soient dans un cristal (fig. 8) deux plans 1 et 2 distants de λ et contenant n_1 et n_2 particules par unité de surface. Si chaque particule saute en moyenne Γ fois par seconde, le nombre de particules quittant le plan 1 dans la direction ox pendant le temps dt est $n_1\Gamma\, dt$; le nombre de particules quittant le plan 2 : $n_2\Gamma\, dt$.

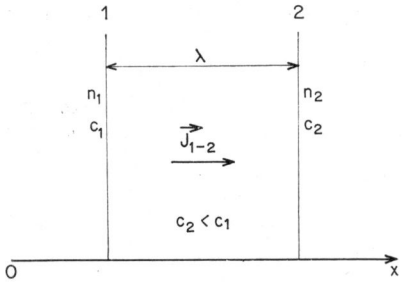


FIG. 8.

Étant donné que la particule qui sort du plan 1 a une chance sur deux d'aller dans le plan 2, le flux net du plan 1 vers le plan 2 est :

$$J_{1\to 2} = \frac{1}{2}(n_1 - n_2)\,\Gamma$$

n_1 a les dimensions d'une masse divisée par une surface : ML^{-2}, $\frac{n_1}{\lambda}$ a donc pour dimensions ML^{-3} ; c'est une concentration.

D'où : $\qquad C_1 = \frac{n_1}{\lambda} \qquad$ et $\qquad C_2 = \frac{n_2}{\lambda}$

$$J_{1\to 2} = \frac{1}{2}(C_1 - C_2)\,\lambda\Gamma$$

Si $\Delta C = C_1 - C_2$ est suffisamment petit, on peut écrire :

$$\frac{\Delta C}{\Delta x} \simeq \frac{dC}{dx}$$

avec : $\qquad \Delta x = \lambda \qquad$ et $\qquad \frac{dC}{dx} < 0$

et : $\qquad J_{1\to 2} = -\frac{1}{2}\lambda^2\Gamma\frac{dC}{dx}$

Par analogie avec la première relation de Fick : $J = -D\frac{dC}{dx}$

Il vient :

$$D = \frac{1}{2}\lambda^2\Gamma$$

Il s'agit là d'un traitement simplifié qui ne tient pas compte :
des différents chemins que la particule peut emprunter,
de la probabilité pour qu'un chemin soit emprunté,
de l'existence d'un facteur de corrélation éventuel :
dépendance du $n^{ième}$ saut vis-à-vis du $(n-1)^{ième}$.

Si le milieu est soumis à une source d'énergie telle qu'un champ électrique, un gradient thermique, ce calcul doit être modifié.

En admettant que toutes les particules quittant le plan 1 vont dans le plan 2 et inversement on a :

$$D = \lambda^2\Gamma \qquad (14)$$

Ce calcul suppose que Γ a la même valeur quelque soit le sens de déplacement le long de l'axe *ox*, donc que le phénomène est réversible.

B — *Énergétique du déplacement — Théorie des vitesses absolues de réaction*

Cette théorie se propose de décrire un système qui évolue par suite de réactions chimiques ou de déplacements de particules comme c'est le cas pour les phénomènes de diffusion et de flux visqueux. Le processus est décrit par le passage d'un point représentatif du système par-dessus une barrière d'énergie, le long d'un axe de coordonnée réactionnelle. Pour le processus de diffusion, on considère une particule qui se déplace d'un site (état à faible énergie) à un autre, en passant par un état d'énergie plus élevée. Ce déplacement est repéré par rapport à un axe de coordonnées *ox* par exemple.

A. E. Stearn, R. M. Barrer, (réf. cit in W. Jost, 1963) et H. Eyring (1941) ont appliqué cette théorie à la diffusion dans les solides.

Le but est de calculer le coefficient D. La relation (14) montre qu'il faut déterminer Γ.

1. *Calcul de* Γ.

Rappelons que Γ est le nombre de sauts qu'une particule effectue en une seconde. Certains auteurs l'appellent encore vitesse spécifique de réaction pour la diffusion.

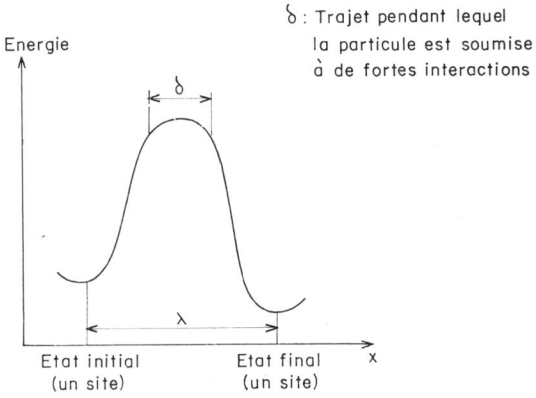


Fig. 9.

Des forces (forces dues aux interactions électrostatiques, aux tensions du réseau) s'opposent au déplacement de la particule. On peut donc définir une barrière de potentiel correspondant à un type de déplacement donné.

Sur un certain trajet δ, la particule est soumise à de fortes interactions et son énergie est alors élevée. L'allure de la variation de l'énergie potentielle est donnée dans la figure 9.

La théorie envisagée pose que la vitesse du phénomène est donnée par la vitesse avec laquelle la particule franchit cette distance.

Si $\overline{\dot{x}}$ est la vitesse moyenne d'une particule $\left(\overline{v} = \frac{dx}{dt}\right)$, celle-ci mettra un temps $\tau = \frac{\delta}{\dot{x}}$ pour parcourir le trajet δ, donc pour franchir la barrière de potentiel. Le nombre de particules qui franchissent cette barrière est proportionnel à $\frac{1}{\tau}$ et au nombre C de particules dont l'énergie est au moins égale à la hauteur de la barrière de potentiel (on dit que les particules sont dans un état activé). Ce nombre est égal au nombre de particules $C\Gamma$ quittant leur position :

$$C^* \frac{1}{\tau} = C\Gamma \tag{15}$$

C : nombre de particules occupant un site (état à faible énergie).

C* : nombre de particules ayant une énergie égale ou supérieure à la hauteur de la barrière de potentiel.

C et C* sont des nombres de particules par unité de volume.

Γ : fréquence de saut

De (15)
$$\Gamma = \frac{C^*}{C} \cdot \frac{1}{\tau}$$

Il faut calculer $\frac{C^*}{C}$ et $\frac{1}{\tau}$

a) *Calcul du rapport* C*/C.

On exprime ce rapport à l'aide des fonctions de partition (Ph. D. EYRING, 1941).

La probabilité pour qu'une particule ait l'énergie ε dans un état qui peut être décrit par g fonctions des coordonnées et du temps, est proportionnelle à $g\ exp - \left(\frac{\varepsilon}{kT}\right)$.

k : constante de *Boltzmann*
T : température absolue

La probabilité totale de présence f d'une espèce de particules donnée dans un volume donné est la somme de termes $g_i\ exp - \left(\frac{\varepsilon_i}{kT}\right)$ correspondants à tous les états possibles.

$$f = \sum_i g_i \exp\left(-\frac{\varepsilon_i}{kT}\right) \tag{16}$$

f : fonction de partition d'une particule dans un volume donné. Une fonction de partition complète fait intervenir toutes les formes d'énergie :

$$f = f\,(\text{translation}) \times f\,(\text{vibration}) \times f\,(\text{rotation}) \times \cdots \tag{17}$$

Compte tenu de la définition précédente, le rapport $\frac{C^*}{C}$ est égal au rapport $\frac{f^*}{f}$ des fonctions de partition complètes correspondant aux particules dans l'état activé (f^*) et dans l'état initial (f).

$$\frac{C^*}{C} = \frac{f^*}{f} \tag{18}$$

Le plus souvent, on fait intervenir une translation dans l'explication du phénomène de diffusion. Pour cette raison, on explicite la fonction de partition de translation qui est différente selon que la particule occupe un site à basse énergie ou se trouve dans l'état activé. Conformément à (17), (18) s'écrit en individualisant les fonctions de partition de translation :

$$\frac{C^*}{C} = \frac{f^*}{f} = \frac{(f^*)' \times f^*\,(\text{translation})}{f' \times f\,(\text{translation})} \tag{19}$$

Les fonctions f' correspondent aux autres types d'énergie.
Étant donné la relation (16) la fonction de partition de translation a pour expression :

$$f_{tr} = \sum g_{tr} \exp\left(-\frac{\varepsilon_{tr}}{k\mathrm{T}}\right)$$

Une étude quantique montre que les niveaux d'énergie de translation sont très voisins les uns des autres. On peut alors considérer que la distribution de l'énergie est continue (PH. D. EYRING, 1941, p. 156). Il devient possible de remplacer la somme par une intégration.

$$f_{tr} = \int_o^\infty \exp\left(-\frac{\varepsilon_{tr}}{k\mathrm{T}}\right) dn$$

dn : nombre de niveaux dans l'intervalle d'énergie $d\varepsilon_{tr}$.
L'intégration est effectuée sur tous les niveaux d'énergie possibles.

Dans ces conditions, le calcul du rapport $\frac{f_{tr}}{f_{tr}^*}$ donne :

$$\frac{f_{tr}^*}{f_{tr}} = \frac{(2\,\pi m^* k\mathrm{T})^{1/2}}{h}\,\delta$$

m^* : masse effective de la particule dans l'état activé ;
h : constante de *Planck*.
On a

$$\frac{\mathrm{C}^*}{\mathrm{C}} = \frac{f^*}{f} = \frac{(f^*)'}{f'} \cdot \frac{(2\,\pi m^* k\mathrm{T})^{1/2}}{h}\,\delta \qquad (21)$$

Le rapport des fonctions de partition $(f^*)'$ et f' correspondant à toutes les catégories d'énergie sauf à celle de translation peut s'écrire :

$$\frac{(f^*)'}{f'} = \frac{\sum (g^*)' \exp\left(-\frac{(\varepsilon^*)'}{k\mathrm{T}}\right)}{\sum g' \exp\left(-\frac{\varepsilon'}{k\mathrm{T}}\right)}$$

ε' : somme de toutes les énergies de l'état initial, sauf celle de translation.
$(\varepsilon^*)'$: somme de toutes les énergies de l'état activé sauf celle de translation.
Les énergies ε' et $(\varepsilon^{*\prime})$ sont données par rapport à un niveau de référence : le niveau de plus basse énergie de l'état initial (voir fig. 10).

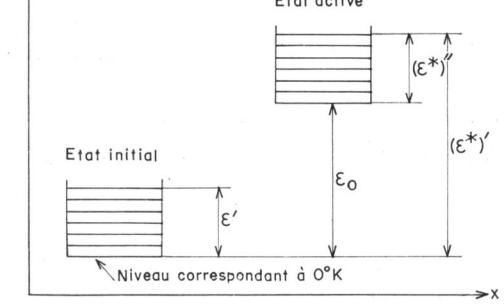


FIG. 10. — *Diagramme relatif aux différents niveaux énergétiques*

On a donc :

$$(\varepsilon^*)' = \varepsilon_o + (\varepsilon^*)''$$

d'où
$$\frac{(f^*)'}{f'} = \frac{\sum (g^*)' \exp(-(\varepsilon^*)''/kT)}{\sum g' \exp(-\varepsilon'/kT)} \cdot \exp(-\varepsilon_o/kT)$$

$$\frac{(f^*)'}{f'} = \frac{(f^*)''}{f''} \exp(-\varepsilon_o/kT)$$

Cette expression est valable pour une molécule. Pour une molécule-gramme :

$$\frac{(F^*)'}{F'} = \frac{(F^*)''}{F''} \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right) \tag{22}$$

L'expression (21) s'écrit alors sous la forme habituellement utilisée :

$$\frac{C^*}{C} = \frac{(2\pi m^* kT)^{1/2}}{h} \cdot \delta \cdot \frac{(F^*)''}{F''} \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right) \tag{23}$$

b) *Calcul de* τ.

Considérons toujours un déplacement dans une direction, *ox* par exemple (système à un degré de liberté de translation). On a

$$\tau = \frac{\delta}{\bar{\dot{x}}}$$

$\bar{\dot{x}}$: valeur moyenne de la vitesse. En voici le calcul :

La probabilité pour qu'une particule ait une vitesse comprise entre $\dot{x}$ et $\dot{x} + d\dot{x}$ $\left(\dot{x} = \frac{dx}{dt}\right)$ est donnée par la loi de *Boltzmann* :

$$P(\dot{x}) = \text{Constante} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_c}{kT}\right) d\dot{x} \tag{24}$$

ε_c = énergie cinétique dans la direction *ox*, $\varepsilon_c = \frac{1}{2} m\dot{x}^2$.

La valeur moyenne de $\bar{\dot{x}}^2$ est :

$$(\bar{\dot{x}}^2) = \frac{\sum (\text{vitesse})^2 \times \text{Probabilités}}{\sum \text{Probabilités}} = \frac{\int_o^{+\infty} \exp\left(-\frac{\varepsilon_c}{kT}\right) \dot{x}^2 \, d\dot{x}}{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{\varepsilon_c}{kT}\right) d\dot{x}}$$

d'où
$$\bar{\dot{x}}^2 = \frac{kT}{2\pi m} \qquad \text{et} \qquad \bar{\dot{x}} = \left(\frac{kT}{2\pi m}\right)^{1/2}$$

Pour une particule dans l'état activé :

$$\bar{\dot{x}} = \left(\frac{kT}{2\pi m^*}\right)^{1/2}$$

Le temps moyen τ mis par une particule pour parcourir la distance δ est :

$$\tau = \frac{\delta}{\bar{\dot{x}}} = \delta \cdot \left(\frac{2\pi m^*}{kT}\right)^{1/2} \tag{25}$$

La formule (15) permet maintenant d'exprimer Γ

$$\Gamma = \frac{C^*}{C} \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{(2\pi m^* kT)^{1/2}}{h} \cdot \delta \cdot \frac{(F^*)''}{F''} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \left(\frac{kT}{2\pi m^*}\right)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right)$$

et : $$\Gamma = \frac{kT}{h} \cdot \frac{(F^*)''}{F''} \cdot \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right) \qquad (26)$$

Remarques :

1. Le terme δ n'apparaît pas dans l'expression de Γ. Il n'était donc pas nécessaire de faire des restrictions quant à sa valeur.

2. Γ a les dimensions de $\frac{kT}{h}$, soit l'inverse d'un temps. C'est donc bien une fréquence, conformément à la définition qui en avait été donnée.

Compte tenu des relations (14) et (26), l'expression du coefficient de diffusion D est la suivante :

$$D = \lambda^2\Gamma = \lambda^2 \frac{kT}{h} \cdot \frac{(F^*)''}{F''} \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right) \qquad (27)$$

Les restrictions faites dans le paragraphe II A 2c concernant la formule $D = \lambda^2\Gamma$, sont toujours valables.

2. *Coefficient de diffusion et température.*

La formule (27) montre évidemment que D dépend de la température. On peut noter que le facteur $\frac{(F^*)''}{F''} \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right)$ correspond au degré de désordre α qui avait été introduit précédemment.

E_0 est la variation d'énergie de la particule (ici d'une molécule-gramme) lorsqu'elle passe d'un état à faible énergie (site) à l'état activé. On pose :

$$K^* = \frac{(F^*)''}{F''} \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right)$$

et on admet que l'on peut écrire (voir W. JOST, 1964).

$$RT \operatorname{Log} K^* = -\Delta F^* = -(\Delta H^* - T\Delta S^*)$$

ΔF^* : variation d'énergie libre lors du passage à l'état activé.

ΔH^* et ΔS^* sont les variations d'enthalpie et d'entropie correspondantes ; (27) s'écrit :

$$D = \lambda^2 \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{\Delta S^*}{R}\right) \exp\left(-\frac{\Delta H^*}{RT}\right) \qquad (28)$$

Si les variations de volume sont négligeables, on montre que la variation d'enthalpie est égale à l'énergie d'activation déterminée expérimentalement par la relation d'Arrhenius.

On a donc :

$$D = e\lambda^2 \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{\Delta S^*}{R}\right) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \qquad (29)$$

Cette relation permet d'utiliser les résultats expérimentaux. D étant mesuré, il reste trois paramètres à déterminer :

1° λ : distance de saut ou distance qui sépare deux positions pour lesquelles l'énergie de la particule est faible. Ce paramètre peut être déterminé par des mesures comme c'est le cas pour des cristaux (étude des réseaux cristallins). Dans d'autres cas, il faut formuler des hypothèses concernant la valeur de λ et sa dépendance vis-à-vis de facteurs tels que la température, la concentration en substance diffusante par exemple.

2° E : la variation de D en fonction de la température permet de déterminer la valeur de l'énergie d'activation dans les domaines où le logarithme de D est une fonction linéaire de $\frac{1}{T}$. Il est des cas où plusieurs valeurs de E sont possibles, ce qui indique l'existence de mécanismes différents.

3° ΔS^* : On ne peut faire que des hypothèses concernant ce paramètre, hypothèses qui n'ont pas toujours de fondements expérimentaux.

III. — DIFFUSION DES PARTICULES CHARGÉES

Les théories et les calculs précédents sont valables quelle que soit la nature des particules qui diffusent. Cependant la diffusion des particules chargées doit faire l'objet d'un certain nombre de remarques, en raison de l'importance théorique et pratique de ce sujet. L'importance théorique réside dans le fait que ces phénomènes de diffusion concernent les électrolytes, les cristaux ioniques et sont reliés au phénomène de conductivité électrique. L'importance pratique apparaîtra pleinement dans la deuxième partie de cet exposé, car la mobilité des ions dans les argiles et les sols y sera envisagée.

A. — *Coefficient de diffusion et mobilité*

1. *Relation de Nernst-Einstein.*

Le coefficient de diffusion est relié à la mobilité par la relation :

$$D = uk\mathrm{T} \tag{30}$$

C'est la relation de *Nernst-Einstein*. Elle a tout d'abord été établie pour les liquides mais sa validité pour les solides a été également démontrée (N. F. MOTT, R. W. GURNEY, 1940) de la façon suivante :

Soient des particules de charge ε dans un champ électrique défini par $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\ \varphi$ (φ = potentiel). Si on suppose que φ varie suivant l'axe ox, le milieu étant repéré par rapport aux trois axes de coordonnées ox, oy, oz, on a :

$$E = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

A une distance x, le potentiel est φ et l'énergie électrique d'une particule est $\varepsilon\varphi$. Le nombre n de particules qui se trouve en x est proportionnel à

$$\exp\left(-\frac{\varepsilon\varphi}{k\mathrm{T}}\right) \tag{31}$$

Le champ $\vec{E}$ provoque un déplacement des particules, il y a donc création d'un gradient de concentration. Dès lors, il existe deux courants opposés, l'un dû au gradient de concentration, l'autre au champ $\vec{E}$. Quand l'état stationnaire est atteint, le courant total est nul. On a :

$$\varepsilon D\frac{dn}{dx} = n\varepsilon \cdot u\varepsilon E$$

d'où

$$un\varepsilon^2 E - \varepsilon D\frac{dn}{dx} = 0$$

En intégrant, il vient :

$$n = C^{te} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon u\varphi}{D}\right) \tag{32}$$

Si l'on compare (31) et (32) on a : $\frac{1}{k\mathrm{T}} = \frac{u}{D}$ d'où

$$D = uk\mathrm{T} \tag{33}$$

2. *Influence de la concentration.*

Il a été signalé précédemment que le coefficient de diffusion pouvait dépendre de la concentration en substance diffusante. La relation $D = uk\mathrm{T}$ permet d'écrire une expression du flux J pour laquelle il est plus facile de mettre en évidence le rôle de la concentration.

On a :

$$J = - D \text{ grad } C = - uk T \text{ grad } C$$

En écrivant $k = \frac{R}{N}$:

$$J = - u \cdot \frac{R}{N} T \text{ grad } C = - \frac{u}{N} RT \cdot C \cdot \frac{1}{C} \text{ grad } C$$

Or, si le potentiel chimique correspondant est de la forme

$$\mu = \mu_o + RT \text{ Log } C$$

$$\text{grad } \mu = RT \cdot \frac{1}{C} \cdot \text{grad } C$$

Donc :

$$J = - \frac{C}{N} u \text{ grad } \mu$$

Deux faits peuvent expliquer la dépendance de D vis-à-vis de la concentration :

1° La mobilité u dépend de la concentration.
2° Le comportement du système s'écarte du comportement idéal.

Posons $D_0 = ukT$; on a conformément à ce qui précède :

$$J = - \frac{D_o}{RT} C \cdot \text{grad } \mu = - \frac{D_o}{RT} C \cdot \text{grad}_c \mu \cdot \text{grad}_{xyz} C$$

Pour une diffusion monodimensionnelle :

$$J = - \frac{D_o}{RT} C \cdot \frac{\partial \mu}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$$

L'expérience donnera le coefficient global, c'est-à-dire :

$$D = \frac{D_o}{RT} C \frac{\partial \mu}{\partial C}$$

On voit que D peut dépendre de la concentration.
— par D_0 (si u dépend de C).
— par l'écart avec le comportement idéal traduit par le facteur :

$$\frac{C}{RT} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial C} = 1 + \frac{d \text{ Log } \gamma}{d \text{ Log } C}$$

(γ : coefficient d'activité).

3. *Coefficient de diffusion mutuelle.*

Lorsque dans un milieu, plusieurs espèces ioniques sont susceptibles de diffuser, il faut définir un coefficient de diffusion mutuelle. Soit par exemple, un milieu où des ions A et des ions B peuvent se déplacer. Si leurs mobilités sont différentes, ce qui est généralement le cas, il y aura création d'un potentiel de diffusion et les mouvements de A et B seront couplés de façon que l'électroneutralité du système soit maintenue. Si A est un cation, B un anion, les deux flux J_A et J_B seront dirigés dans le même sens. Si A et B sont des cations J_A et J_B seront de sens opposé.

Dans ces conditions, on montre (F., HELFFERICH (1962), W., JOST (1960)) que la diffusion de A est décrite par la relation :

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \text{div } (D_{AB} \text{ grad } C_A) \qquad (34)$$

On aurait une relation semblable pour B.
avec

$$D_{AB} = \frac{D_A D_B (C_A Z_A^2 + C_B Z_B^2)}{D_A C_A Z_A^2 + D_B C_B Z_B^2} \tag{35}$$

D_A et D_B : coefficients d'autodiffusion.
C_A et C_B : concentrations.
Z_A et Z_B : valences des ions A et B.
L'équation (34) n'est pas linéaire car D_{AB} dépend de C_A et des solutions numériques en ont été données (R. M., BARRER 1963 *a* 1963 *b*).
Il est utile de noter que si l'un des coefficients D_A ou D_B est très petit par exemple $D_B \ll D_A$ on a :

$$D_{AB} = D_B \left(1 + \frac{C_B Z_B^2}{C_A Z_A^2}\right)$$

La diffusion de A est limitée par la mobilité de B.
En toute rigueur, la relation (35) n'est valable que pour les solutions idéales. Une expression plus générale du coefficient de diffusion mutuelle a été donnée par R. M. BARRER (1964).

B. — *Mesures de conductivité*

L'application d'un champ électrique à un système donné provoque le déplacement des particules chargées, d'où l'existence d'un courant. Les mesures de conductivité électrique qui en résultent permettent de déterminer les mobilités ioniques.

En effet, on a :

$$\sigma = u\varepsilon^2 Z^2 n \tag{36}$$

σ = conductivité
u = mobilité
ε = charge élémentaire
Z = valence
n = nombre d'ions/unité de volume.

Si plusieurs espèces ioniques sont présentes, la conductivité totale est

$$\sigma = \sum_i \sigma_i$$

Ces mesures électriques permettent de déterminer des valeurs du coefficient de diffusion indépendamment des mesures de diffusion (application des formules 34 et 33).
De nombreuses expériences ont été effectuées sur des cristaux ioniques et les résultats montrent que la diffusion et la conductivité électrique relèvent des mêmes mécanismes de déplacement. En particulier les variations de $\text{Log } \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ ou de $\text{Log } D = f\left(\frac{1}{T}\right)$ sont reliées aux propriétés des défauts de réseau.
Les problèmes posés par l'interprétation des mesures de conductivité comparées aux mesures de diffusion seront examinés dans la deuxième partie de cet exposé.

CONCLUSION

Il est en général possible d'effectuer une expérience de diffusion, donc de déterminer une ou plusieurs valeurs du coefficient de diffusion caractéristiques d'un système donné. Le résultat obtenu est un résultat global qui ne fait intervenir aucune hypothèse relative aux mécanismes des mouvements particulaires. Il suffit que les conditions aux limites soient définies pour qu'il soit possible de calculer le coefficient D à partir des mesures de flux ou de concentrations.
Une analyse plus poussée conduit à envisager l'influence de différents facteurs tels que la concentration, l'existence de réactions chimiques par exemple. L'étude du coefficient d'autodiffusion

permet une analyse plus approfondie du problème relatif au mouvement d'une seule espèce de particule dans un milieu donné. Il est alors plus facile de faire apparaître les paramètres physiques dont dépend la mobilité des particules.

L'étude d'un phénomène de diffusion peut donc se situer à trois niveaux différents. La finesse de l'analyse dépend de la connaissance que l'on a des propriétés structurales et physicochimiques du milieu et des conditions expérimentales.

Reçu pour publication en janvier 1967.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARRER R. M., BARTHOLOMEW, R. F., REES L. V. C., 1963 *a*. Ion exchange in porous crystal. *Part. I Internation. Journ. Phys. chem of solids*, **24**, n° 1, p. 51-62.

BARRER R. M., BARTHOLOMEW A. F., REES L. V. C., 1963 *b*. Ion exchange in porous crystal. *Part II. Internation. Journ Phys. Chem of Solids*, **24**, n° 1, p. 303-317.

BARRER R. M., REES L. V. C., 1964. Self and exchange diffusion coefficients. *Journ. Phys. Chem. of solids*. Pergamon. Press., **25**, p. 1035-1038.

CRANK J., HARTLEY G. S., 1949. *Some fundamental definitions and concepts in diffusion processes. Trans. Farad. Soc.* **45** p. 801-818.

CRANK J., 1964. *The Mathematics of Diffusion.* Clarendon Press.

DE GROOT S. R., 1952. *Thermodynamics of irreversible processes*. Interscience Publishers Inc. New York.

EYRING Ph. D., 1941. *The theory of rate processes*. Mac Graw Hill. Book Company.

HELLFFERICH F., 1962. *Ion exchange*. Mac Graw Hill. Book Company.

JOST W., 1960. *Diffusion in solids, liquids and gases*. Academic Press. New York.

LILIARD A. B., 1964. Application of the non equilibrium thermodynamics to diffusion in solids. *Proc. of British. Ceramic Soc.* n° 1, p. 137-144.

MOTT N. F., GURNEY R. W., 1940. *Electronic processes in ionic crystal* Dover.

SHEWMON P. G., 1963. *Diffusion in solids*. Mac Graw Hill Series.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : DUPONT et DUVAL (1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatres langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur-Gérant : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — *6-1967.*

Dépôt légal : 2e trimestre 1967. N° d'impression : 545.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 18 1967 NUMÉRO 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS-7e

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs et de l'Institut national de Recherche agronomique, à l'exception des sommaires et résumés.

Ann. agron., 1967, **18** (3), 243-266.

PREMIERS RÉSULTATS D'UNE ÉTUDE SUR LES EFFETS DE LA DÉSINFECTION DES SOLS PAR LA VAPEUR

Ginette SIMON-SYLVESTRE

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles

SOMMAIRE

Ce travail a pour but de mesurer l'influence de la désinfection des sols à la vapeur sur leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques en vue de séparer les origines de l'effet bénéfique observé sur les cultures après l'emploi de cette technique.

INTRODUCTION

Les maraîchers de la région parisienne utilisent fréquemment la désinfection à la vapeur. Tout en détruisant certains parasites (insectes, champignons ...) et en entravant la germination des graines d'adventices, ce qui d'ailleurs constitue leur premier objectif, ils obtiennent une influence favorable sur le développement des cultures (précocité, rendement ...) : il s'agit là des premiers effets, visibles, rentables de cette technique, effets que nous étudions dans la première partie de notre travail. Nous avons ensuite essayé d'analyser les actions secondaires de la désinfection à la vapeur afin de rechercher les origines possibles de l'effet bénéfique constaté sur la végétation. C'est pourquoi nous avons étudié dans une seconde partie l'influence de cette technique sur les différentes propriétés des sols et les résultats obtenus sont discutés dans une troisième partie.

MODE OPÉRATOIRE

Les deux premières désinfections, points de départ de ce travail, ont été réalisées dans deux terres utilisées actuellement pour la culture maraîchère, mais différentes quant à leur passé cultural.

Le premier sol, à Montesson, est un sol de grande culture, réservé à la production légumière seulement depuis peu de temps, à la suite de certaines circonstances : proximité de Paris pour la vente, texture favorable du sol pour ce genre de cultures...

Par contre, la région de Créteil est consacrée au maraîchage depuis plusieurs générations. Des apports fréquents de fumiers et de gadoues urbaines expliquent la richesse de cette terre aussi bien en azote minéral qu'en carbone comme nous le verrons ultérieurement.

Pour généraliser certains résultats et compléter quelques points, un troisième essai de désinfection a eu lieu à Versailles dans un limon des plateaux, utilisé habituellement pour la grande culture.

Les différentes désinfections ont été effectuées le 4 février 1960 à Montesson avant une culture de laitues, le 18 février 1961 à Créteil et le 25 mai 1965 à Versailles avant une plantation de poireaux. Dans tous les cas, il s'agit de désinfection en surface par la vapeur d'eau sous pression. L'appareillage utilisé est identique : une chaudière alimente des tubes creux, perforés, disposés sous une cloche qui peut être déplacée progressivement sur le terrain.

Pour obtenir une bonne efficacité du traitement, il faut tenir compte pour la durée de la désinfection, de la saison, de la composition physique et de l'humidité du terrain (travaux antérieurs de HARRANGER et *al.*, 1960).

Dans nos essais, nous nous sommes placés dans les meilleures conditions possibles pour réaliser des désinfections identiques à celles pratiquées par les maraîchers.

A Montesson, la cloche est laissée 7 minutes et la température atteint 90°. A Versailles, la désinfection dure 15 minutes et le thermomètre après l'enlèvement de la cloche marque 99°5 à 5 cm dans le sol. La température descend alors rapidement au départ puis plus lentement ensuite.

après	5	minutes	87°
—	15	—	76°
—	30	—	64°
—	45	—	57°
—	60	—	50°
—	80	—	48°

Pour cette étude, des échantillons de sol ont été prélevés avant, puis immédiatement après la désinfection, en surface et à 10 centimètres de profondeur à Montesson, et uniquement en surface à Créteil. De nouveaux prélèvements ont été effectués ultérieurement dans les mêmes parcelles, afin de suivre les effets de cette désinfection au cours du temps. En présence de culture, ils sont faits entre les rangs. Certaines analyses, en particulier les analyses biologiques et les dosages d'azote minéral, ont toujours été réalisées sur des échantillons fraîchement prélevés.

OBJECTIF PRIMORDIAL DE LA DÉSINFECTION A LA VAPEUR ACTION SUR LA VÉGÉTATION

Des remarques sur le développement des plantes cultivées et adventices ont été effectuées lors des prélèvements de sol.

Ainsi que cela a été signalé à plusieurs reprises, nous avons noté une action très nette sur la végétation spontanée. Pendant toute la durée des observations, les surfaces traitées ne sont pas envahies par les mauvaises herbes. Cet effet bénéfique, en permettant de réduire la main-d'œuvre pour les binages, entraîne, de l'avis même des maraîchers, une économie appréciable et justifie à lui seul l'emploi de cette technique.

L'influence sur les cultures est également très sensible, dans le sens d'une croissance plus rapide.

Ainsi, à Montesson, le 11 avril, soit deux mois après la désinfection, les salades présentent un développement différent suivant les parcelles :

— parcelles non traitées : 4 à 5 feuilles de 2 à 3 cm de largeur ;

— parcelles traitées: 7 à 8 feuilles de 4 cm de largeur en moyenne.

Cette avance se maintient pendant toute la croissance de la culture, et la récolte des lots désinfectés, effectuée le 20 mai, se situe 8 à 10 jours plus tôt que celle des lots témoins. Ceci peut présenter éventuellement un intérêt non négligeable : sur le plan commercial, la récolte arrive sur le marché avant l'abondance et sur le plan technique le terrain est libéré plus tôt.

Le 20 mai, les poids moyens sont respectivement de 198 g et de 164 g pour les salades des parcelles désinfectées ou non.

Les mêmes faits se reproduisent à Créteil. Le 31 mai, date du dernier prélèvement de terre, les poireaux sont plus verts, plus vigoureux dans les parcelles désinfectées. Dans les autres parcelles, ils sont par contre plus petits et plus jaunes.

Poids moyen frais de 10 poireaux, prélevés le 31 mai :

après désinfection : 219 g,
sans — : 145 g.

Il est possible d'affirmer que, d'une façon générale, la désinfection à la vapeur conduit ainsi que cela avait déjà été signalé (HARRANGER et *al.*, 1960 ; JOHNSON, 1946), à une certaine précocité ainsi qu'à un développement plus important de la végétation, se traduisant par un gain de poids souvent notable.

Il paraissait intéressant de confirmer ces résultats au champ par des essais au laboratoire. Une culture (seigle) fut donc réalisée suivant la technique de Neubauer légèrement modifiée, (MAC GEORGE, 1946), avec de la terre prélevée dans les différentes parcelles de Montesson. L'effet compétitif entre les mauvaises herbes et la culture est alors éliminé dans cette expérience.

Cinq lots sont constitués, quatre avec la terre désinfectée ou non, prises l'une et l'autre en surface (les 10 premiers cm) et en profondeur et un cinquième (témoin), contenant uniquement du sable

Au cours de la croissance, les seigles cultivés sur la terre prélevée en surface dans les parcelles désinfectées ont des feuilles plus vertes, plus grandes et plus ouvertes. Les trois autres lots contenant de la terre, ne présentent pas de différences sensibles. Par contre, le lot témoin a une végétation plus faible et de couleur violacée à la base indiquant des symptômes de carence.

Le poids sec de 100 plantes, exprimé en mg (moyenne de 3 cristallisoirs) est le suivant :

Témoin sable	1 850
Terre surface	2 400
Terre à 10 cm de profondeur	2 410
Terre désinfectée surface	3 060
Terre désinfectée à 10 cm de profondeur	2 560

En absence de mauvaises herbes même dans le témoin, l'effet est encore très net pour la terre désinfectée prélevée en surface : l'accroissement de poids, confirme les résultats obtenus dans la pratique.

Par contre, compte tenu des erreurs d'expérience, il est possible d'admettre que l'effet de la vapeur ne se fait plus sentir au-delà de 10 cm, ce qui est simplement normal avec l'appareillage utilisé.

EFFETS SECONDAIRES DE LA DÉSINFECTION A LA VAPEUR ACTION SUR LES PROPRIÉTÉS DU SOL

En fait, l'action de la vapeur sur les propriétés du sol a déjà fait l'objet de plusieurs publications étrangères. Mais généralement les essais ont été effectués au laboratoire, à partir de terre stérilisée à l'autoclave, dans des conditions de température, durée et pression variables suivant les auteurs :

98° et 125° pour RUSSEL et HUTCHINSON (1909) ;
55° et 100° pour ces mêmes auteurs (1912-1913) ;
65° pendant 1 heure pour WAKSMAN et STARKEY (1923) ;
deux heures et demie à une pression de 15 *pounds* pour KATZNELSON (1940) ;
45 minutes à 120°, puis 30 minutes le lendemain pour MALOWANY et NEWTON (1947) ;
sept heures à une pression de 45 *pounds* pour MARTIN (1948-1949) ;
deux heures à cette même pression pour ALDRICH et MARTIN (1952) ;
deux heures pour PETERSON (1962) ;

Quelques rares expériences ont cependant été réalisées sur des sols en place (WALKER et THOMPSON, 1949 à 100° avec le système à pipes HODDESDON).

Malheureusement, il nous a été parfois difficile de tirer une conclusion générale des résultats obtenus, ceux-ci étant quelquefois discordants, compte tenu des conditions extrêmement variables des expériences. De plus, mis à part quelques essais réalisés à l'extérieur, ces conditions étaient très différentes de celles de nos essais pour que les résultats soient transposables. Nous avons donc repris ces expériences en essayant d'analyser les effets de la désinfection en surface tant sur les propriétés chimiques que physiques et biologiques.

A. — INFLUENCE SUR LES PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Dans nos essais, nous avons suivi, après la désinfection, l'évolution des éléments principaux, au cours du temps.

1. *Azote*

a) *Azote minéral.*

La méthode habituelle (extraction avec Cl^2Ca normal, rapport $\frac{\text{terre}}{\text{réactif}} = \frac{1}{10}$, suivie d'une distillation en présence de magnésie seule ou complétée avec de l'alliage Dewarda) a été utilisée pour doser les deux formes d'azote minéral (ammoniacal et nitrique) dans les différents échantillons de sol.

A partir du 11 avril, les prélèvements de terre à Montesson sont effectués entre les rangs de laitues : il s'ensuit que les résultats du 11 avril et du 20 mai sont à attribuer à un sol cultivé.

L'examen détaillé du premier tableau conduit à une remarque qu'il est préférable de faire avant d'aborder la comparaison des parcelles témoin et des parcelles traitées.

Les quantités d'azote minéral trouvées dans le témoin sont variables au cours de la période considérée. Il ne s'agit là que de la mise en évidence d'un fait connu, à savoir que l'azote minéral d'un sol cultivé ou non présente des fluctuations au

Influence de la désinfection à la vapeur sur la teneur en azote ammoniacal et nitrique du sol

Résultats exprimés en kg N par hectare (à raison de 3 000 tonnes de terre par ha)

à Montesson

Date des prélèvements	4 février 1960		8 février		29 février		11 avril		20 mai	
	NH_3	NO_3	NH_3	NO_3	NH_3	NO_3	NH_3	NO_3	NH_3	NO_3
Surface										
témoin	6,3	8,4	0	16,8	4,2	6,3	4,2	18,9	0	42,0
désinfectée	10,5	25,2	8,4	29,4	27,3	0	12,6	37,8	0	46,2
Profondeur										
témoin	2,1	17,8	0	4,2	0	14,7	4,2	29,4	0	10,5
désinfectée	10,5	12,6	0	46,2	0	27,3	0	58,8	0	14,7

à Créteil

Date des prélèvements	18 février 1961		22 mars		31 mai	
	NH_3	NO_3	NH_3	NO_3	NH_3	NO_3
Surface						
témoin	3,6	79,2	Résultats erronés par suite d'un apport de nitrate d'ammonium entre le 1er et le 2e prélèvement			
après désinfection ..	75,9	63,6				

cours d'une année : minimum en hiver, le taux d'azote augmente dès le début du printemps pour atteindre un maximum en mai-juin suivant les conditions climatiques.

Pour les deux terres étudiées, le traitement à la vapeur fait apparaître une augmentation de la teneur en azote minéral, ainsi qu'un accroissement du taux d'azote ammoniacal. L'effet semble beaucoup plus net pour les échantillons de Créteil, ce qui viendrait confirmer l'observation de WAKSMAN (1923), qui signale une accumulation d'azote minéral plus importante dans les sols riches en matière organique que dans les terres pauvres. Or les terres de Montesson et de Créteil contiennent respectivement 23,75 et 42,8 p. 100 de carbone. Les faibles quantités d'azote minéral d'ailleurs trouvées pour le premier sol prouvent qu'il ne s'agit pas d'une terre maraîchère proprement dite.

Tous les auteurs consultés, quelles que soient les méthodes utilisées, s'accordent d'ailleurs pour mentionner la présence après désinfection d'une concentration anormale d'azote ammoniacal qui proviendrait de la dégradation des composés organiques du sol. Pour la terre de Montesson, il faut attendre le prélèvement du 20 mai, c'est-à-dire trois mois et demi après le traitement pour avoir la disparition de cet azote ammoniacal.

b) *Azote minéralisable.*

Celui-ci est évalué d'après la méthode DROUINEAU (1949).

Les différences entre les terres, traitées ou non, sont plus importantes que dans le cas de l'azote minéral.

Les terres désinfectées présentent une meilleure aptitude à fournir de l'azote minéral aux plantes ainsi qu'en témoignent les tableaux ci-dessous :

Influence de la désinfection à la vapeur sur l'azote minéralisable des sols
(après 28 jours à 28°)

Résultats exprimés en kg N par hectare (à raison de 3 000 tonnes de terre par ha)

à Montesson

Date des prélèvements	4 février 1960		8 février		29 février		11 avril		20 mai	
	NH_3	NO_3	NH_3	NO_3	NH_3	NO_3	NH_3	NO_3	NH_3	NO_3
Surface										
témoin	0	12,6	0	46,2	0	42,0	0	88,2	0	105
désinfectée	10,5	151,2	0	201,6	0	157,5	0	172,5	0	132,3
Profondeur										
témoin	0	0	0	10,5	0	37,8	0	52,5	0	54,6
désinfectée	0	50,4	0	107,1	0	68,1	0	113,4	0	44,1

à Créteil

Date du prélèvement	18 février 1961	
	NH_3	NO_3
Surface		
témoin.....	0	136,5
désinfectée	0	357,0

Pour les deux formes d'azote étudiées, l'influence du traitement se fait sentir principalement sur la couche superficielle du sol ; toutefois, il ne faut pas omettre de signaler qu'à 10 cm de profondeur, l'effet est encore sensible (voir Montesson).

L'enrichissement du sol désinfecté en azote minéral et minéralisable entraîne une augmentation du taux de cet élément chez les végétaux qui y sont cultivés. RUSSEL et HUTCHINSON (1909 et 1912) l'avaient d'ailleurs déjà montré.

à Montesson	(salade)	Témoin	3,77 % N	traité	4,50 % N
à Créteil	(poireau)	—	2,97 % N	traité	3,36 % N

Le même phénomène est observé avec le seigle cultivé dans les essais Neubauer précédemment décrits :

Influence de la désinfection à la vapeur sur la teneur en azote des végétaux
(essais NEUBAUER)

Résultats exprimés en % N

Témoin	
Racines	1,23
Tiges	1,52
Après désinfection	
Racines	1,29
Tiges	1,84

Ainsi qu'il fallait s'y attendre, les parties aériennes sont plus sensibles à cet enrichissement du milieu. L'azote, on le sait, favorise le développement des organes végétatifs et en particulier celui des organes foliacés.

2. *Acide phosphorique assimilable*

L'acide phosphorique assimilable est dosé seulement sur la terre de Montesson avec la méthode TRUOG (1930), en raison de la teneur en calcaire de ce sol.

D'après les résultats des différents prélèvements, il semble y avoir un léger enrichissement de la terre désinfectée ; celui-ci disparaît d'ailleurs après deux mois, sans doute par suite de l'absorption des plantes :

Influence de la désinfection sur les phosphates assimilables de la terre de Montesson

(résultats exprimés en $^0/_{00}$ P_2O_5)

Date des prélèvements	4 février 1960	29 février	11 avril	20 mai
Témoin				
Surface	0,88	0,72	0,96	0,82
Profondeur	0,86	0,78	0,92	0,86
Après désinfection				
Surface	1,12	1,01	0,8	0,8
Profondeur	1,15	1,03	0,95	0,82

Dans leurs expériences, MALOWANY et NEWTON (1947) ont également constaté à la suite de la désinfection, une augmentation du taux des phosphates solubles à la fois dans l'eau et dans le réactif TRUOG. Pour ALDRICH et MARTIN au contraire (1952), l'influence de la désinfection à la vapeur est de peu d'importance. Il faut rapprocher des résultats de MALOWANY et NEWTON ceux obtenus par RUSSEL et HUTCHINSON (1909 et 1912) qui ont trouvé à l'analyse un enrichissement en acide phosphorique des végétaux cultivés sur une terre désinfectée.

3. *Potassium, calcium et magnésium échangeables*

C'est à partir d'un extrait de terre à l'acétate d'ammonium normal que ces trois éléments ont été dosés :

— le potassium par photométrie de flamme ;
— le calcium et le magnésium par complexométrie en présence de noir ériochrome T.

Influence de la désinfection par la vapeur sur le potassium échangeable (Montesson)
résultats exprimés en $^0/_{00}$ K_2O

	Prélèvement du 4 février 1960
Témoin	
Surface	0,14
Profondeur	0,15
Après désinfection	
Surface	0,16
Profondeur	0,19

Les parcelles traitées sont donc légèrement enrichies. Malheureusement, par suite d'un apport de carbonate de potassium quelques jours après la désinfection, il a été impossible de suivre les répercussions ultérieures du traitement sur cet élément. Une augmentation du potassium soluble avait été également observée par ALDRICH et MARTIN (1952).

En ce qui concerne le calcium et le magnésium échangeables, les différences sont pratiquement inexistantes, aussi paraît-il inutile de fournir ici un relevé des chiffres obtenus. Par contre, ALDRICH et MARTIN (1952) ont constaté, après désinfection, une plus forte teneur en calcium et magnésium solubles.

4. *Sulfates solubles à l'eau*

Un léger enrichissement en sulfates solubles à l'eau apparaît après la désinfection ainsi qu'en témoignent les résultats des dosages des extraits de sol (rapport $\frac{\text{terre}}{\text{eau}} = 1$).

Montesson (surface seulement)

Témoin	6 ppm S
Après désinfection	9,4 ppm S

MALOWANY et NEWTON (1947) ont déjà remarqué une action identique dans certaines de leurs expériences.

5. *pH*

ALDRICH et MARTIN (1952), NEWHALL (1955) ne signalent pas de répercussions sur le pH du sol. Dans nos essais, aucune différence importante n'apparaît, si ce n'est une légère baisse, plus notable en surface, pour la terre de Montesson.

A Créteil :.

4 prélèvements en surface

Témoin	8,0	8,05	8,0	8,0
Après traitement.....	8,05	8,10	8,05	8,10

A Montesson :

Témoin surface	7,25
profondeur	7,20
Après traitement	
surface	6,8
profondeur	7,0

B. — INFLUENCE SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Plusieurs auteurs ont signalé dans leurs publications une action du traitement à la vapeur sur les propriétés physiques des sols. Certains, JOHNSON (1946) et WIEBE (1958) notamment, ne parlent que de modifications de ces propriétés, sans plus de détails, d'autres, au contraire, comme STRØMME (1962) précisent qu'il s'agit d'une amélioration.

Par ailleurs, LE BORGNE et MONNIER (1959) ont mis en évidence l'influence favorable de la chaleur sèche (feu) sur la stabilité structurale de la couche superficielle des sols.

Aussi, a-t-il paru intéressant de rechercher si dans les deux essais entrepris, certaines propriétés physiques du sol n'étaient pas modifiées. Ces recherches ont été entreprises seulement à propos de la stabilité structurale et de la perméabilité (coefficient de percolation) suivant les techniques décrites dans l'ouvrage d'HÉNIN et de ses collaborateurs (1960), techniques complétées par FEODOROFF (1960) en ce qui concerne la stabilité structurale.

Au départ, il s'agit de deux terres très stables, aussi le traitement à la vapeur n'a-t-il que peu d'effet. L'action est d'ailleurs pratiquement inexistante pour la terre de Créteil qui renferme à l'origine une quantité plus importante d'agrégats stables. Par contre, il est noté une très légère augmentation de la stabilité structurale en surface pour la terre de Montesson comme l'indiquent les chiffres suivants :

Indice S (prélèvement du 4 février, jour de la désinfection)

Témoin	
Surface	0,218
Profondeur	0,17
Après désinfection	
Surface	0,087
Profondeur	0,17

Quant au coefficient de percolation, sa mesure, pour la partie superficielle de la terre de Montesson conduit à de grandes différences entre le témoin et l'échantillon traité. Ainsi, en une heure, il passe à travers une colonne de terre de dimension définies :

1 860 cm^3 d'eau pour le témoin

3 270 cm^3 d'eau pour l'échantillon traité.

La terre de Montesson très perméable naturellement, le devient encore davantage après le traitement à la vapeur.

La faible influence de la désinfection à la vapeur sur ces deux propriétés physiques résulte, on peut le présumer, de la nature spéciale des terres expérimentées : ce sont en effet deux terres maraîchères, riches en matières organiques (surtout Créteil), stables et perméables. Il paraissait alors intéressant de reprendre cette étude sur une terre de composition plus normale. comme un sol de grande culture ; ce fut l'objet d'un troisième essai réalisé en 1965 dans un limon des plateaux de Versailles (au lieu dit « les Grands-Closeaux »), avant une plantation de poireaux et comprenant quatre parcelles témoin et quatre parcelles désinfectées à la vapeur.

Les pourcentages d'agrégats stables sont déterminés dans des échantillons de sol prélevés le jour du traitement à la vapeur et quinze jours plus tard.

Les tests à l'alcool et à l'eau ne permettent pas d'interprétation particulière ; celui au benzène, par contre, mérite une certaine attention.

Pourcentage d'agrégats stables après le prétraitement au benzène

(moyenne de 4 parcelles)

Date du prélèvement	26 mai 1965	10 juin 1965
Témoin	3,65	3,7
Traitement vapeur.....	5,95	4,15

Le pourcentage d'agrégats stables (après le prétraitement au benzène) s'accroît immédiatement après la désinfection, mais cet accroissement n'est pas durable puisque quinze jours plus tard la différence entre les deux catégories de parcelles s'est beaucoup atténuée. Nous retrouvons là un phénomène déjà mis en évidence par MONNIER (1965) lors d'un apport organique au sol. L'accroissement de stabilité est alors lié aux fermentations qui se développent dans le milieu. Aussitôt après la désinfection, ainsi qu'il le sera signalé ultérieurement dans le mémoire, il se produit des fermentations, le dégagement de gaz carbonique est accru, certains microorganismes, les bactéries ammonifiantes deviennent plus actifs. Toutefois, le « coup de fouet du départ » s'atténue rapidement, le dégagement de CO_2 diminue après une quinzaine de jours, l'activité des microorganismes mentionnés ci-dessus décroît. En même temps, l'amélioration de la stabilité structurale disparaît, la désinfection à la vapeur n'a alors qu'un effet fugace sur cette propriété physique des sols.

C. — Influence sur les propriétés biologiques des sols

Dans un sol, les différents groupes de microorganismes sont en équilibre dynamique. Or, à la suite de la désinfection à la vapeur, cet équilibre risque d'être modifié. Le but de cette étude consiste à déterminer les modifications de cet équilibre immédiatement après le traitement et à suivre son évolution au cours des mois suivants.

Pour ce travail, ont été utilisées les méthodes proposées par Pochon (1954) dans son *Manuel technique d'analyse microbiologique des sols.*

1. *Influence sur l'activité biologique globale des terres*

Plusieurs techniques permettent d'évaluer l'activité biologique globale d'une terre dont le dénombrement de la microflore totale et la mesure du gaz carbonique dégagé.

a) *Dénombrement de la microflore totale*

On utilise un milieu liquide à base d'extrait de terre ensemencé avec des dilutions de sol.

Influence de la désinfection à la vapeur sur la microflore totale

Terre de Montesson
(les résultats sont exprimés en millions de germes par gramme de terre sèche)

Date du prélèvement	4 février (1)	8 février	29 février	11 avril	20 mai
Témoin					
Surface	30	8	160	140	110
Profondeur	35	11	25	17	20
Après désinfection					
Surface	1,4	3,5	17,5	45	350
Profondeur	35	3	3	25	17

(1) Date de la désinfection à la vapeur.

L'effet est net en surface : le nombre de microorganismes a beaucoup diminué dès la désinfection. Cette diminution se maintient un certain temps, mais s'estompe peu à peu par suite, sans doute, d'un repeuplement. Ce fait a d'ailleurs déjà été signalé par plusieurs auteurs, Waksman et Starkey (1923), Aldrich et Martin (1952). Trois mois et demi après le traitement, la population apparaît même supérieure à celle du témoin.

En profondeur, par contre, l'action n'est pas sensible, et malgré un chiffre légèrement aberrant (29 février) et compte tenu des erreurs d'appréciation intrinsèques à la méthode, la population est sensiblement identique à celle des parcelles non désinfectées.

b) *Mesure du dégagement de gaz carbonique.*

Ce dégagement reproduit d'une manière relativement fidèle l'activité microbienne totale d'une terre. Le gaz carbonique mesuré représente la résultante de plusieurs processus dont les deux principaux sont en général :

la libération de CO_2 à partir de la décomposition de matières organiques,
et la réutilisation d'une partie de ce CO_2 pour des synthèses microbiennes.

Les mesures sont faites, à intervalles réguliers, avec un analyseur de gaz, type Onera, dont le fonctionnement est basé sur l'absorption de l'infra rouge par le gaz carbonique.

Dégagement journalier de CO_2 exprimé en chiffres de l'analyseur pour l'équivalent de 100 g de terre sèche

Terre de Montesson

Lieu du prélèvement	Du 5 au 8 février	Du 8 au 11	Du 11 au 15	Du 15 au 18	Du 18 au 22	Du 22 au 23
Témoin						
Surface (1).....	0,200	0,200	0,175	0,183	0,212	0,216
Profondeur (2)	0,166	0,200	0,175	0,200	0,225	0,216
Après désinfection						
Surface (3).....	0,800	0,383	0,275	0,283	0,300	0,216
Profondeur (4)	0,316	0,200	0,187	0,183	0,225	0,216

	Du 25 au 1er mars	Du 1er au 8 mars	Du 8 au 15	Du 15 au 22	Du 22 au 30	Du 30 au 6 avril	Du 6 au 12	Du 12 au 20
(1)	0,250	0,100	0,150	0,143	0,112	0,128	0,116	0,087
(2)	0,262	0,121	0,150	0,143	0,113	0,135	0,108	0,093
(3)	0,175	0,078	0,107	0,107	0,075	0,100	0,083	0,062
(4)	0,212	0,114	0,135	0,135	0,112	0,121	0,108	0,075

	Du 20 au 27	Du 27 au 10 mai	Du 10 au 23	Du 23 au 8 juin	Du 8 au 22	Du 22 au 7 juillet
(1)	0,100	0,088	0,069	0,068	0,071	0,046
(2)	0,107	0,100	0,073	0,078	0,067	0,053
(3)	0,085	0,080	0,073	0,071	0,064	0,056
(4)	0,107	0,092	0,076	0,071	0,064	0,060

Dégagement journalier de CO_2 exprimé en chiffres de l'analyseur pour l'équivalent de 100 g de terre sèche

Terre de Créteil

Lieu du prélèvement	Du 21 au 23 février	Du 23 au 27	Du 27 au 3 mars	Du 3 au 9	Du 9 au 20	Du 20 au 30 mars
Témoin						
Surface	0,443	0,343	0,303	0,287	0,288	0,240
Après désinfection						
Surface	0,893	0,540	0,472	0,362	0,201	0,228

Les données des tableaux ont été traduites en graphique :

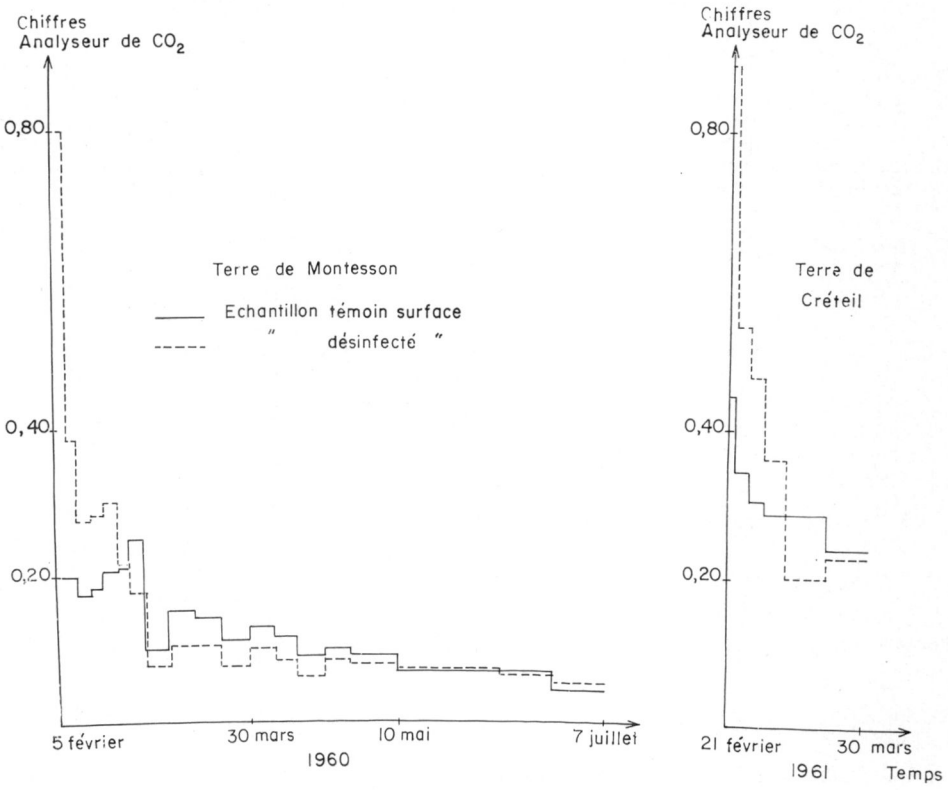


FIG. 1. — *Dégagement journalier de gaz carbonique*

Pour les deux terres (Montesson et Créteil), la désinfection conduit à des résultats identiques. Au départ, en surface, le dégagement est plus intense dans le sol traité ; ceci avait déjà été mentionné par WAKSMANN (1923) ; ce gaz carbonique libéré en surplus proviendrait en partie d'un début de dégradation des matières organiques ;

parallèlement, la terre prend une teinte légèrement plus foncée (fait signalé par JOHNSON (1946)) et a une odeur nauséabonde assez prononcée indiquant qu'elle est le siège de fermentations. Le dégagement de gaz carbonique présente un maximum immédiatement après le traitement puis diminue progressivement pour devenir ensuite très légèrement inférieur à celui du témoin ; ceci se passe respectivement entre le 17e et le 20e jour et le 14e et le 25e jour pour les terres de Montesson et de Créteil. Les différences entre les diverses parcelles disparaissent finalement vers 3 mois et demi.

Apparemment, les résultats obtenus par les deux méthodes sont contradictoires. La désinfection amène immédiatement une diminution du nombre de germes et une augmentation du dégagement de CO_2. Ce qui ne peut s'expliquer que si on admet que le CO_2 dégagé provient surtout d'une dégradation chimique et non d'une activité biologique intense. Il restera à déterminer ultérieurement la source de cette dégradation : la nature organique du sol ou les corps microbiens tués par cette désinfection.

2. *Influence sur différents groupes de microorganismes*

Les recherches n'ont porté que sur quelques groupes de microorganismes. Dans chaque cas les conditions de milieu étaient telles que seul le groupe étudié voyait son développement favorisé et pouvait être alors apprécié quantitativement.

Ainsi pour les bactéries fixatrices aérobies et les bactéries cellulolytiques aérobies ont été utilisées les techniques de WINOGRADSKY, et pour les champignons inférieurs le milieu de MARTIN (1950), en présence de Rose Bengale et de Streptomycine, ces deux derniers produits limitant la croissance des bactéries et des actinomycètes.

a) *Bactéries fixatrices aérobies.*

Influence de la désinfection à la vapeur sur les bactéries fixatrices aérobies

Nombre de grains de terre positifs (moyenne de 2 boîtes)
(ensemencement avec 25 grains par boîte)

Terre de Montesson

Date du prélèvement	4 février	8 février	11 avril	20 mai
Témoin				
Surface	21	21	21	21
Profondeur	22	22	23	24
Après désinfection				
Surface	0	0	2	2
Profondeur	23	22	20	24

D'après les résultats obtenus avec la terre de Montesson, le dénombrement des fixateurs aérobies en profondeur (10 cm) n'est pas influencé par la désinfection.

Par contre, en surface l'influence est très forte puisque ces germes disparaissent après traitement et cela pour les deux sols. Ils ont tendance à réapparaître, d'ailleurs

assez timidement, vraisemblablement par suite d'un réensemencement consécutif à des façons culturales ayant permis un certain mélange des couches superficielles avec les couches voisines.

Terre de Créteil (moyenne de 8 boîtes)

Date du prélèvement	18 février	22 mars	31 mai
Témoin			
Surface	18	9*	19
Après désinfection			
Surface	0	0	4

* Un apport de nitrate d'ammonium peu de temps avant ce prélèvement est venu gêner le développement des bactéries fixatrices d'azote.

b) *Bactéries cellulolytiques aérobies.*

Influence de la désinfection à la vapeur sur les bactéries cellulolytiques aérobies
Nombre de grains de terre positifs (moyenne de 2 boîtes)
(ensemencement avec 10 grains par boîte)

terre de Montesson

Date du prélèvement	4 février	8 février	29 février	11 avril	20 mai
Témoin					
Surface.....	7	6	5	8	8
Profondeur	8	6	5	5	8
Après désinfection					
Surface	1	1	2	7	6
Profondeur	7	5	5	9	8

Terre de Créteil (moyenne de 8 boîtes)

Date du prélèvement	18 février	22 mars	31 mai
Témoin			
Surface	9	4	10
Après désinfection			
Surface	0	2	10

D'après l'examen des deux tableaux précédents, l'action de la désinfection à la vapeur sur les bactéries cellulolytiques aérobies apparaît moins prononcée que celle sur les fixateurs aérobies. Leur disparition en surface, totale pour la terre de Créteil ou presque totale pour celle de Montesson dure moins longtemps. Le réensemencement dans les sols considérés se fait relativement vite et trois mois et demi après le traitement, le nombre de colonies est pratiquement identique, dans les deux cas, à celui trouvé dans les parcelles témoins.

Comme pour les bactéries fixatrices aérobies, l'influence de la désinfection est nulle en profondeur.

c) *Champignons inférieurs.*

Pour le dénombrement des champignons inférieurs, différentes dilutions de sol sont étalées à la surface de boîtes de Petri renfermant le milieu de MARTIN (1950) ; les lectures sont effectuées 8 jours après l'ensemencement.

Influence de la désinfection à la vapeur sur les champignons inférieurs

Nombre de colonies par boîte (moyenne de 3 boîtes)

Terre de Montesson

Date du prélèvement	4 février		8 février		11 avril		30 mai	
Dilution	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}
Témoin								
Surface	46	7	7*	0	35	7	13	0
Profondeur	6	1	19	1	19	7	7	1
Après désinfection								
Surface	1	2	2	1	3	1	7	1
Profondeur	5	2	4	2	25	2	5	0

* Une période de froid entre le 1er et le 2e prélèvement expliquerait la diminution notable des champignons à la surface du témoin et leur augmentation en profondeur.

Nombre de colonies, pour 3 boîtes (moyenne de 12 boîtes)

Terre de Créteil

Date du prélèvement	18 février		22 mars		31 mai	
Dilution	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}
Témoin						
Surface	36	5	22	9	36	9
Après désinfection						
Surface	1	0	5	1	11	6

L'examen des tableaux montre que la désinfection à la vapeur entraîne une diminution très importante des champignons inférieurs dans les couches superficielles du sol.

Dès 1923, WAKSMANN et STARKEY avaient signalé la mort de nombreux champignons : leurs corps, d'après eux, fournissent une quantité non négligeable de matières assimilables.

Le réensemencement de la surface se fait peu à peu, et trois mois et demi après la désinfection, un nouveau dénombrement indique dans les parcelles traitées une proportion de champignons atteignant respectivement 30 et 50 p. 100 de ceux existant dans les parcelles témoin de Créteil et de Montesson. WAKSMAN (1923) avait également observé une augmentation lente du nombre des champignons inférieurs, lesquels, dans ses essais, mettaient quatre mois et demi pour repeupler les parcelles traitées.

Pour les couches plus profondes, au-delà de 10 cm, les chiffres variables obtenus ne permettent pas de conclure à une influence de la désinfection.

Le milieu utilisé ne permet pas de savoir si les colonies développées proviennent d'une spore ou d'un fragment de mycélium. En outre, il serait intéressant de connaître la sensibilité des différents genres et espèces à l'action de la vapeur.

DISCUSSION

Il paraît intéressant dans une dernière partie de tenter d'expliquer à partir des observations recueillies et des analyses effectuées au laboratoire, les raisons de l'effet bénéfique constaté après la désinfection des sols à la vapeur.

Dans les résultats exposés précédemment, plusieurs faits retiennent l'attention :

— Le traitement à la vapeur conduit à l'apparition immédiate d'une quantité anormale d'azote ammoniacal, fait déjà signalé par tous les auteurs. Cette forme d'azote est en général difficilement tolérée par les cultures, si elle est en excès ; aussi les maraîchers qui ont remarqué cette action néfaste, attendent-ils empiriquement deux à trois semaines après le traitement pour semer et planter.

— Un dégagement important de gaz carbonique apparaît aussitôt après la désinfection, puis diminue rapidement.

— La plupart des microorganismes du sol, Bactéries et Champignons sont touchés par la désinfection. Seules des bactéries ammonifiantes, probablement sporulées, résistent au traitement ainsi que le prouvent les résultats obtenus pour le troisième essai de désinfection, réalisé à Versailles, sur un limon de plateaux.

Activité des bactéries ammonifiantes

mg d'azote ammoniacal dégagé en 25 jours (somme)
(moyenne de 4 essais)

Versailles

Date du prélèvement	25 mai (désinfection)	10 juin	31 août
Parcelle témoin.....	5,16	4,80	5,87
Parcelle vapeur.....	8,25	7,49	5,36

L'activité des bactéries ammonifiantes a été suivie, tous les deux à trois jours, dans différents échantillons de sol par titration de l'ammoniac dégagé avec de l'acide sulfurique N/50.

L'activité des bactéries ammonifiantes est accrue immédiatement après la désinfection, puis elle se ralentit peu à peu pour finalement, après trois mois, se rapprocher de celle trouvée dans les parcelles témoin. Plusieurs hypothèses peuvent alors être envisagées suivant la place dans le temps de ces trois faits :

1. *La formation d'azote ammoniacal et le dégagement de gaz carbonique sont antérieurs à l'accroissement d'activité des bactéries ammonifiantes.* — L'azote ammoniacal aurait alors une origine chimique. Il est, en effet, possible que les températures atteintes par le traitement à la vapeur causent la dégradation de certaines protéines (provenant soit de la matière organique du sol, soit de nombreux corps microbiens tués) en composés plus simples (amides, amines, acides aminés ...) dont certains pourraient fournir de l'ammoniac au cours de la distillation à l'ébullition en présence de magnésie. Parallèlement, le dégagement intense de gaz carbonique pourrait provenir de cette dégradation.

2. *La formation d'azote ammoniacal et le dégagement de gaz carbonique sont postérieurs à l'accroissement d'activité des bactéries ammonifiantes.* — Dans ce cas, NH_3 et CO_2 auraient une origine biologique et ce seraient les bactéries ammonifiantes qui en seraient responsables. L'ammonification, est en effet, le seul processus biologique, qui se poursuit normalement après le traitement à la vapeur : il est dû principalement, tout au moins dans la première phase, à des bactéries sporulées, résistantes à la chaleur.

De plus, cette ammonification peut être activée par le jeu de plusieurs processus :

— Absence ou diminution de la compétition avec d'autres microorganismes. Lors de la désinfection, les champignons inférieurs sont tués en grande partie, certaines bactéries disparaissent également plus ou moins (bactéries cellulolytiques aérobies, bactéries fixatrices d'azote...). Cette action du traitement à la vapeur sur la microflore n'est pas uniquement négative puisque les bactéries, qui ont été épargnées, notamment les sporulées, en profitent pour proliférer plus rapidement. Leur multiplication active s'accompagne d'une libération importante d'azote ammoniacal et de gaz carbonique.

— Augmentation de l'activité des bactéries ammonifiantes placées dans des conditions de milieu plus favorables. En effet, le traitement à la vapeur, entraine, au moins temporairement, des modifications physiques qui conviennent particulièrement aux bactéries ammonifiantes (humidité, chaleur, mauvaise aération après le passage de la vapeur ...).

— De plus, la désinfection cause la dégradation des corps microbiens tués en produits plus simples qui deviennent plus facilement assimilables pour les bactéries résistantes au traitement. Ces dernières ont alors à leur disposition une alimentation plus importante. Toutes ces conditions (diminution de la compétition, conditions de milieu plus favorables, meilleure assimilabilité de certains éléments) provoquent chez ces bactéries comme « un coup de fouet » analogue à ce qui se passe lors des apports au sol de matière organique non décomposée (Waksman, 1923; Simon, 1960). Ce « coup de fouet » se traduit par un dégagement intense et immédiat de gaz carbonique ; il est néanmoins de courte durée, peut-être à la suite d'une diminution des réserves

alimentaires et du changement des conditions de milieu, le tout entraînant une diminution d'activité des bactéries ammonifiantes.

Généralement, l'azote ammoniacal formé est immédiatement transformé par les bactéries nitrifiantes et ne s'accumule pas. Ce n'est pas le cas après la désinfection. Les modifications physiques apportées au milieu (chaleur, humidité ...) ne conviennent pas à la nitrification, processus essentiellement aérobie. Il est même possible que, les agents responsables de cette nitrification, *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*, qui ne résistent guère au-dessus de 50°, soient tués sinon en totalité, tout au moins en partie. La nitrification ainsi entravée, ne suivrait donc pas la cadence de l'ammonification au contraire activée, et il en résulterait une accumulation d'azote ammoniacal.

Certains auteurs ont en effet signalé la destruction des bactéries nitrifiantes RUSSELL et HUTCHINSON (1912), NEWHALL (1955) et leur réapparition seulement après ensemencement du milieu. D'autres, par contre, n'avaient mentionné qu'un arrêt momentané de leur activité (WAKSMAN et STARKEY, 1923; STRØMME, 1962), mais tous opéraient dans des conditions artificielles entraînant par suite des températures atteintes, la destruction ou l'inactivation temporaire des bactéries nitrifiantes. Un de nos essais, *in vitro*, confirme d'ailleurs ces résultats :

Minéralisation de la terre autoclavée après 28 jours à 28°

	mg d'azote dans 100 g de terre		Pourcentage d'azote minéral sous la forme ammoniacale
	NH_3	NO_3	
Terre témoin			
Non stérilisée	0	4,13	0
Terre stérilisée			
1/4 heure.....	3,84	0,22	94,6
1/2 heure.....	3,54	0,24	93,65
1 heure.....	3,46	0,37	89,9

Nous avons stérilisé à 120°, à l'autoclave, pendant des temps variables un sol humide (20 p. 100) de la région de Toulouse. L'effet de ce mode de désinfection est différent de ce qui est observé au champ. Dans ce cas, aussitôt après le traitement il n'y a pas de modification de la teneur en azote minéral, en particulier pas d'augmentation d'azote ammoniacal. Les matières organiques du sol ne seraient pas touchées par cette stérilisation à l'autoclave. Cette terre humide, stérilisée ou non, est ensuite mise dans des conditions favorables de minéralisation (température et humidité) ; 28 jours plus tard, la même quantité d'azote minéral est retrouvée, que la terre soit stérilisée ou non, seules les formes ont varié. Dans la terre témoin, il ne reste plus d'azote ammoniacal, tout l'azote minéral est nitrique, tandis que dans les terres stérilisées, plus des 9/10 de l'azote minéral est à l'état ammoniacal.

La petite quantité d'azote nitrique présente dans la terre stérilisée provient vraisemblablement de l'azote nitrique préexistant avant le traitement.

Après une désinfection à l'autoclave, les bactéries nitrifiantes ont disparu, seules les bactéries ammonifiantes sont actives et l'azote ammoniacal s'accumule.

Par contre, dans nos essais au champ la libération anormale d'azote ammoniacal immédiatement après la désinfection est accompagnée simultanément d'une augmentation du taux d'azote nitrique. En plus, l'azote ammoniacal présent dans le sol, est transformé peu à peu en azote nitrique ; en trois mois et demi, il l'est en totalité. Dans les conditions de nos expériences, les bactéries nitrifiantes ne seraient donc pas totalement détruites.

Une étude de l'activité des bactéries nitreuses et nitriques dans l'essai de Versailles nous a permis de savoir que celle-ci était réduite d'environ 50 p. 100 après une désinfection à la vapeur et qu'elle redevenait légèrement supérieure à la normale trois mois après le traitement. Pour le mettre en évidence, nous avons recherché colorimétriquement dans deux milieux liquides électifs (l'un pour les bactéries nitreuses, l'autre pour les bactéries nitriques), ensemencés avec des suspensions, dilutions de terre, la dilution moyenne pour laquelle apparaissent respectivement les nitrites et les nitrates (POCHON, 1954).

Dilution moyenne à laquelle apparaissent NO_2 et NO_3
(moyenne de 4 répétitions)

Date du prélèvement	25 mai		10 juin		31 août	
	NO_2	NO_3	NO_2	NO_3	NO_2	NO_3
Témoin	1,75	1,85	1,90	1,95	1,20	1,70
Parcelles vapeur.....	0,75	1,0	1,0	1,10	1,90	2,0

Dans ce cas, il est donc possible de retenir comme explication de l'augmentation notable de la teneur en azote ammoniacal, un accroissement de l'activité des bactéries ammonifiantes favorisées par les conditions de milieu et un ralentissement au départ, de l'activité des bactéries nitrifiantes, ce qui entraîne une accumulation de l'ammoniac formé. Toutefois, malgré cette baisse d'activité il est vraisemblable que cette teneur élevée en azote ammoniacal soit la cause des quantités importantes d'azote nitrique retrouvées parfois dans les parcelles traitées.

3. *Dans une dernière hypothèse, il peut être envisagé une association des deux processus cités précédemment* — Le gaz carbonique dégagé et l'azote ammoniacal formé pourraient avoir une origine double : chimique et biologique. Les mesures de CO_2 et de NH_3 ne représentent qu'un bilan : nous n'avons jusqu'ici aucun renseignement sur l'origine de ces deux produits. Il faudrait ultérieurement essayer de mettre en évidence la source de ce gaz carbonique et de cet azote ammoniacal.

Par suite de l'accroissement de la teneur des sols en azote minéral et minéralisable, les plantes ont à leur disposition dans l'immédiat et dans le proche futur une alimentation azotée plus importante, ce qui d'ailleurs entraîne plusieurs conséquences visuelles notées dans nos essais, telles qu'une action favorable sur le développement des cultures et des répercussions sur l'intensité de leur coloration et sur leur précocité.

Néanmoins, cet enrichissement en azote, malgré son importance (de l'ordre de 20 à 60 kg/ha en surface d'azote minéral et de 150 à 220 kg d'azote minéralisable respectivement dans les sols de Montesson et Créteil), ne suffit pas à lui seul à expliquer les augmentations de rendement. En effet, d'après des essais réalisés par TROCMÉ (1961) sur une de ces terres maraîchères, avec des apports croissants d'azote minéral, il apparaît que le maximum de rendement de l'azote sans désinfection reste toujours nettement inférieur au maximum obtenu après désinfection.

D'autres facteurs interviennent également sur la croissance des plantes. La dégradation des matières organiques du sol par l'action directe de la désinfection, puis par l'augmentation d'activité de certaines bactéries conduit à l'apparition de nouvelles formes d'aliments plus facilement assimilables par les végétaux ; ainsi, nous avons trouvé un enrichissement non négligeable du sol en sulfates solubles à l'eau, en potassium et acide phosphorique assimilables. Les corps microbiens détruits participent également à l'augmentation de toutes ces ressources alimentaires, y compris naturellement à celle de l'azote.

Par contre, les modifications physiques du sol sont trop fugaces dans nos essais pour influer sur les augmentations de rendement.

Il est possible que d'autres produits, à action bénéfique provenant de la dégradation de la matière organique mais pas encore mis en évidence, comme des vitamines, des substances de croissance, apparaissent après le traitement et jouent un rôle favorable.

De plus, il ne faut pas omettre la destruction des parasites animaux et végétaux créant un meilleur état phytosanitaire et la disparition quasi totale des mauvaises herbes entraînant l'absence de compétition avec les cultures pour l'alimentation de ces dernières.

L'effet bénéfique de la désinfection des sols à la vapeur constitue un problème complexe soumis à de nombreux facteurs, expliqués ou non, dont certains d'ailleurs sont plus ou moins liés et dont la résultante conduit à un effet positif fort appréciable.

Reçu pour publication en janvier 1967.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent particulièrement aux deux maraîchers qui ont accepté avec beaucoup de bienveillance d'inclure nos essais au milieu de leurs cultures : MM. André à Montesson et Gestin à Créteil, ainsi qu'à la Station d'Amélioration des Plantes de Versailles qui a permis la réalisation du troisième essai.

Nous tenons également à remercier notre collègue de la Protection des Végétaux de Paris, M. MIMAUD, pour nous avoir signalé les maraîchers pratiquant cette technique dans la région parisienne.

Les stabilités structurales ont été déterminées dans le laboratoire de M. MONNIER, Maître de Recherches au C. N. R. A. Nous remercions bien sincèrement ce dernier pour les résultats qu'il nous a communiqués ainsi que pour leur interprétation.

SUMMARY

INITIAL RESULTS OF A SURVEY ON THE EFFECTS OF STEAM TREATMENT OF SOILS

Steam treatment of soils alters their properties.

The ammonia-nitrogen content increases markedly as soon as such treatment is over, the nitrogenating bacteria converting subsequently this ammonia nitrogen into nitrate nitrogen.

The assimilable phosphoric-acid and potassium, together with the water-soluble sulphates increase slightly in the growing-on plots. Conversely, neither the assimilable calcium and magnesium nor the soil's pH value increase materially.

Both the structural stability and soil permeability are apparently slightly improved though the effects on stability do not last.

The biological properties of the soil are also affected by the steam treatment, after which some sterilization of the soilis testified by a substantially diminished overall microflora. However, this effect gradually vanishes and after some 100 days no trace of it is left.

The aerobe, fixative bacteria, and the aerobe cellulolytic bacteria, which either completely or nearly vanished after the treatment, re-appear more or less quickly after tillage of the various soil layers. The same applies to fungi which had greatly diminished after the treatment.

The steam-treatment method used does not affect the soil more than four inches deep, and yet, the plants grow better and quicker ; their nutrition is much improved.

The reason for this being of course, the virtual disappearance of weeds and a much-reduced microflora, at least initially, and which thus increased the nutritional resources made available for the plants. Moreover, owing to the release of assimilable elements originated from alteration of the organic matter and the death of various micro-organisms, such resources are positively increased after the steam treatment.

ZUSAMMENFASSUNG

ERSTE ERGEBNISSE EINER UNTERSUCHUNG ÜBER DIE WIRKUNGEN DER BODENDESINFEKTION MITTELS DAMPF

Die Bodendesinfizierung mittels Dampf verursacht eine Veränderung der Eigenschaften der Böden.

Unmittelbar nach der Behandlung wird eine starke Zunahme des Gehaltes der Böden an ammoniakalischem Stickstoff festgestellt. Später wird dieser ammoniakalische Stickstoff durch die nitrifizierenden Bakterien des Bodens in Salpeterstickstoff verwandelt.

In den behandelten Parzellen, nehmen die assimilierbaren Phosphorsäure und Kalium, sowie die wasserlöslichen Sulfate um ein Geringes zu. Dagegen wird keine merkliche Veränderung des assimilierbaren Kalziums und Magnesiums, sowie des pH der Böden festgestellt.

Die Stabilität der Struktur wie auch die Permeabilität der Böden scheinen ein wenig verbessert zu sein ; der Einfluss auf die Stabilität ist jedoch nicht dauerhaft.

Die biologischen Eigenschaften der Böden werden ebenfalls durch die Desinfektion beeinflusst. In der Tat, hat letztere eine partielle Sterilisierung zur Folge, die durch eine bedeutende Herabsetzung der gesamten Mikroflora charakteriesiert ist. Diese Wirkung lässt langsam nach um nach dreieinhalb Monaten fast völlig zu verschwinden.

Die fixierenden und cellulolytischen Aerobakterien, die nach der Dampfbehandlung völlig oder fast völlig verschwunden waren, erscheinen, infolge der durch die Bodenbestellungen ausgeübte Mischung der verschiedenen Bodenschichten, mehr oder weniger rasch wieder. Dasselbe gilt auch für die Pilze, deren Zahl nach der Desinfektion stark gesunken war.

Bei dem benutzten Verfahren wirkt sich die Dampfbehandlung nur an der Oberfläche aus. In zehn cm Tiefe wurde keine Wirkung mehr festgestellt.

Nach dieser Behandlung zeigt sich, dass die Kulturen verbessert und beschleunigt sind. Eine bessere Ernährung ist ihnen sichergestellt.

In der Tat trägt das beinahe vollständige Verschwinden des Unkrauts und die wenigstens im Anfang erreichte Herabsetzung der Mikroflora zur relativen Vermehrung der den Kulturen zur Verfügung stehenden Nährstoffen bei. Letztere vermehren sich ausserdem in absoluter Weise nach der Desinfektion, infolge einer Freigabe assimilierbarer Stoffe, die von der Veränderung der organischen Materie und der Abtötung bestimmter Mikro-organismen herstammen.

Первые результаты изучения эффектов дезинфекции почв при помощи пара.

Г. СИМОН-СИЛЬВЕСТР.

РЕЗЮМЕ

Паровая дезинфекция почв вызывает изменения их свойств. Содержание аммиачного азота в этих почвах сильно возрастает сразу после обработки. Позже, бактерии-нитрификаторы превращают этот азот в нитратный.

В обработанных таким способом делянках возрастают также количества усвояемых фосфорной кислоты, калия и ратворимых в воде сульфатов. И, напротив, — содержание усвоямых кальция и магния не испытывает больших изменений, также как и pH почв.

Прочность структуры и водопроницаемость обработанных паром почв как будто слегка улучшаются, но влияние пара на прочность структуры — непродолжительно.

Дезинфекция затрагивает также и биологические свойства почв вызывая частичную стерильность, выражающуюся сильным разрежением общей микрофлоры. Этот эффект понемногу ослабевает и, по истечении трех с половиной месяцев, совершенно исчезает.

Азотофиксирующие и целлулозные аэробные бактерии почти полностью исчезающие после обработки почв паром, снова, более или менее быстро. заселяют перемешанные агротехническими приемами слои почвы. То-же можно сказать и о грибках, количество которых также сильно уменьшается сразу после дезинфекции. В том виде в котором она была применена, обработка почв паром эффективна только в поверхностном слое и не оказывает никакого действия на глубинах превышающих 10 см. После этой обработки культурные растения развиваются лучше и быстрее, вследствие улучшения режима их питания, так как почти полное исчезновение сорняков и разрежение микрофлоры вызывают относительное увеличение питательных рессурсов предоставленных в распоряжение растений. А, кроме того, дезинфекция почв паром, увеличивает рессурсы и в абсолютном смысле, вызывая освобождение усвояемых элементов, благодаря изменениям органического вещества и гибели некоторых микроорганизмов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALDRICH D. G., MARTIN J. P., 1952. Effects of fumigation on some chemical properties of soils, *Soil Sci.*, **73**, p. 149-159.

DROUINEAU G., LEFÈVRE G., 1949. Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. agron.*, p. 154-164.

FEODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol (indice S) : nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, p. 651-659.

HARRANGER J., MIMAUD J., RONSEL G., 1960. La chaleur et la protection sanitaire des cultures. *Phytoma*, p. 13-24.

HÉNIN S., etc., 1960. *Le profil cultural. Principes de physique du sol.* Société d'Éditions des Ingénieurs agricoles.

JOHNSON J., 1946. Soil steaming for disease control, *Soil Sci.*, **61**, p. 83-91.

KATZNELSON H., 1940. Survival of microorganisms inoculated into sterilized soils. *Soil Sci.*, **49**, p. 211-217.

LE BORGNE E., MONNIER G., 1959. Influence du feu sur certaines propriétés du sol. *C. R. Acad. Sci.*, **248**, p. 1549-1551.

MAC GEORGE W. T., 1946. Modified Neubauer method for soil cultures. *Soil Sci.*, **62**, p. 61-70.

MALOWANY S. N., NEWTON J. D., 1947. Studies on steam sterilization of soils. Some effects on physical, chemical and biological properties. *Canad. J. Res.*, **25**, p. 189-208.

MARTIN J. P., 1948. Effects of fumigation, fertilization and various other soil treatments on growth of orange seedlings in old citrus soils. *Soil Sci.*, **66**, p. 273-288.

MARTIN J. P., 1949. Effects of fumigants and other soil treatments in the greenhouse on the fungus population of old citrus soil. *Scil Sci.*, **69**, p. 107-122.

MARTIN J. P., 1950. Use of acid rose bengal and streptomycine in the plate method for estimating soil fungi. *Soil Sci.*, **69**, 215-232.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse. *Ann. agron.*, p. 327-400 et p. 471-534.

NEWHALL A. G., 1955. Disinfestation of soil by heat, flooding and fumigation. *Bot. Rev.*, **21**, p. 189-235.

PETERSON G. H., 1962. Microbial activity in heat and electron sterilized soils seeded with microorganisms. *Canad. J. microb.*, **84**, p. 519-524.

POCHON J., 1954. *Manuel technique d'analyse microbiologique des sols.* Éditeur Masson.

RUSSELL E. J., HUTCHINSON H. B., 1909. The effect of partial sterilization of soil on the production of plant food. *J. agric. Sci.*, **3**, p. 111-144.

RUSSELL E. J., HUTCHINSON H. B., 1912-1913. The limitation of bacteria numbers in normal soils and, its consequences. *J. agric. Sci.*, **5**, p. 152-221.

RUSSELL E. J., HUTCHINSON H. B., 1912-1913. On the growth of plants in partially sterilized soils. *J. agric. Sci.*, **5**, p. 248-287.

SIMON-SYLVESTRE G., 1960. L'enfouissement des pailles dans le sol. Étude générale et répercussions sur la microflore du sol (thèse). *Ann. agron.* p. 5-53 et p. 177-219.

STRØMME ERLING 1962. The effect of soil steaming on the ammoniac and nitrate content of the soil and on the growth of tomato plants. *Acta agron. Xand.*, **12** (1-2), p. 16-48.

TROCMÉ S., BRIANT A., 1961. Désinfection des sols maraîchers à la vapeur et fumure azotée. *C. R. Travaux Stn. Agron.*, p. 34.

TRUOG E., 1930. The determination of the readily available phosphorus of soils. *J. amer. Soc. agron.*, **22**, p. 874-882.

WAKSMAN S. A., STARKEY R. L., 1923. Partial sterilization of soil, microbiological activities and soil fertility I. *Soil. Sci.*, **16**, p. 137-158.

WAKSMAN S. A., STARKEY R. L., 1923. Partial sterilization of soil, microbiological activities and soil fertility II. *Soil Sci.*, **16**, p. 247-268.

WAKSMAN S. A., STARKEY R. L., 1923. Partial sterilization of soil, microbiological activities and soil fertility III. *Soil Sci.*, **16**, p. 343-357.

WALKER T. W., THOMPSON R., 1949. Some observations on the chemical changes effected by the steam sterilization of glasshouse soils. *J. agric. Sci.*, **25**, p. 19-35.

WIEBE J., 1958. Phytotoxicity as a result of steam treatment of soil. *Proc. Amer. Soc. hortic. Sci.* **72**, p. 331-338.

Ann. agron., 1967, **18** (3), 267-283.

ÉTUDE DE LA CIRCULATION DE L'EAU NON SATURANTE DANS DIFFÉRENTES TERRES EN RÉGIME DE DESSÈCHEMENT

J. MORIZET

avec la collaboration technique de R. MILLET

Station agronomique, 36 - Châteauroux

SOMMAIRE

L'appréciation de la mobilité de l'eau, dans différents sols en voie de dessèchement, a été effectuée en utilisant un indice α, déduit de l'étude des profils hydriques de colonnes de terre soumises à l'évaporation en atmosphère contrôlée. Des comparaisons entre ces sols sont réalisées à partir des données expérimentales de cet indice, et les conséquences agronomiques sont discutées.

INTRODUCTION

Il apparaît de plus en plus, et spécialement à la lumière des travaux les plus récents (HALLAIRE, 1963), que la notion de potentiel capillaire seule, soit impuissante à renseigner parfaitement sur la disponibilité de l'eau pour la plante. Il est, en effet, indéniable que d'autres facteurs interviennent dont il faut tenir compte, notamment la vitesse de dessèchement du sol, l'importance et la répartition de l'enracinement, enfin la mobilité de l'eau dans le milieu.

C'est ce dernier facteur que nous nous proposons d'étudier ici, en comparant le comportement de différentes terres soumises à un régime de dessèchement par évaporation de surface. Nous nous bornerons à l'étude des profils hydriques obtenus après avoir ainsi traité les échantillons durant un temps relativement court. Dans ces conditions, les profils hydriques présentent une forme concave tournée vers le bas. Ceci correspond sensiblement au deuxième stade de l'évaporation (débits rapidement décroissants) défini par FEODOROFF et RAFI (1962). En se limitant à cette phase initiale, les profils hydriques présentent une forme simple susceptible d'être

représentée par une équation d'ajustement. D'autre part, l'objet de ce travail étant de procéder à des comparaisons, les essais réalisés peuvent être assimilés à des tests effectués dans des conditions standards.

Nous décrirons d'abord les techniques expérimentales et la méthode d'interprétation utilisée.

Ensuite, nous indiquerons différents facteurs qui peuvent affecter l'allure des profils hydriques et par suite influencer la circulation de l'eau dans le sol en régime de dessèchement.

Enfin, nous comparerons les résultats trouvés à ceux fournis par des essais avec des plantes et à ceux concernant les quantités d'eau évaporées en atmosphère contrôlée.

I. — TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Les terres amenées à l'humidité désirée sont soigneusement brassées et passées au tamis de 5 mm pour obtenir des échantillons aussi homogènes que possible. Elles sont ensuite introduites dans des tubes cylindriques en aluminium de 10 cm de haut et de 4,1 cm de diamètre.

Cette hauteur relativement faible a été choisie, en particulier, pour obtenir un tassement de la terre aussi régulier que possible dans l'ensemble du tube. Aux extrémités du cylindre porte-échantillon sont ajoutées deux hausses de même diamètre dans lesquelles deux pistons, enfoncés à l'aide d'une presse, peuvent comprimer la terre. Les hausses et les pistons enlevés, la terre emplit exactement le cylindre porte-échantillon, et la densité apparente est déterminée par le poids de terre introduite. Les deux extrémités du cylindre sont ensuite bouchées hermétiquement par des capuchons en caoutchouc et les échantillons placés pendant une nuit dans l'étuve bactériologique où aura lieu l'évaporation, pour leur permettre de prendre la température ambiante. La partie supérieure est ensuite débouchée et la surface soumise à une évaporation plus ou moins intense et plus ou moins longue suivant les essais. Cependant, la majorité de ceux-ci ont été effectués dans les conditions suivantes :

— durée d'évaporation : 4 ou 8 h,

— température : 40°C,

— degré hygrométrique de l'ordre de 25 à 30 p. 100, obtenu par la présence de $CaCl_2$ étalé sur une grille métallique au-dessus des échantillons.

Nous avons choisi ces conditions expérimentales de façon à obtenir des intensités d'évaporation du même ordre de grandeur que celles couramment enregistrées en plein champ (de l'ordre de 0,3 à 0,6 mm/h).

L'intensité d'évaporation est contrôlée par les données d'un évaporomètre Piche placé à l'intérieur de l'étuve, de façon à vérifier la constance de l'évaporation potentielle. Dans les conditions d'expérience que nous venons de préciser, les résultats fournis par cet appareil sont de 2,7 $\pm$ 0,2 mm pour 8 h.

A la fin des essais, la colonne de terre est débitée en tranches dont on détermine les humidités de façon à construire son profil hydrique.

II. — GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSULTATS OBTENUS

L'allure des profils hydriques obtenus est très variable suivant différents facteurs que nous analyserons par la suite. Mais nous pouvons déjà signaler l'existence de deux types principaux illustrés par les exemples de la figure 1. Les deux profils indiqués ont été obtenus à partir de deux terres différentes, ayant subi le même traitement (8 h d'évaporation à 40°C) :

— Le profil n° 1 (humidité initiale $H_{0(1)}$ correspondant à la capacité au champ), est caractérisé par son aspect presque linéaire. La dessiccation intéresse aussi bien les zones profondes que la surface.

— Au contraire, dans le profil n° 2 (humidité initiale $H_{0(2)}$ correspondant également à la capacité au champ), les gradients d'humidité sont marqués dans les zones superficielles qui se dessèchent fortement, à l'inverse de la profondeur dont l'humidité varie peu.

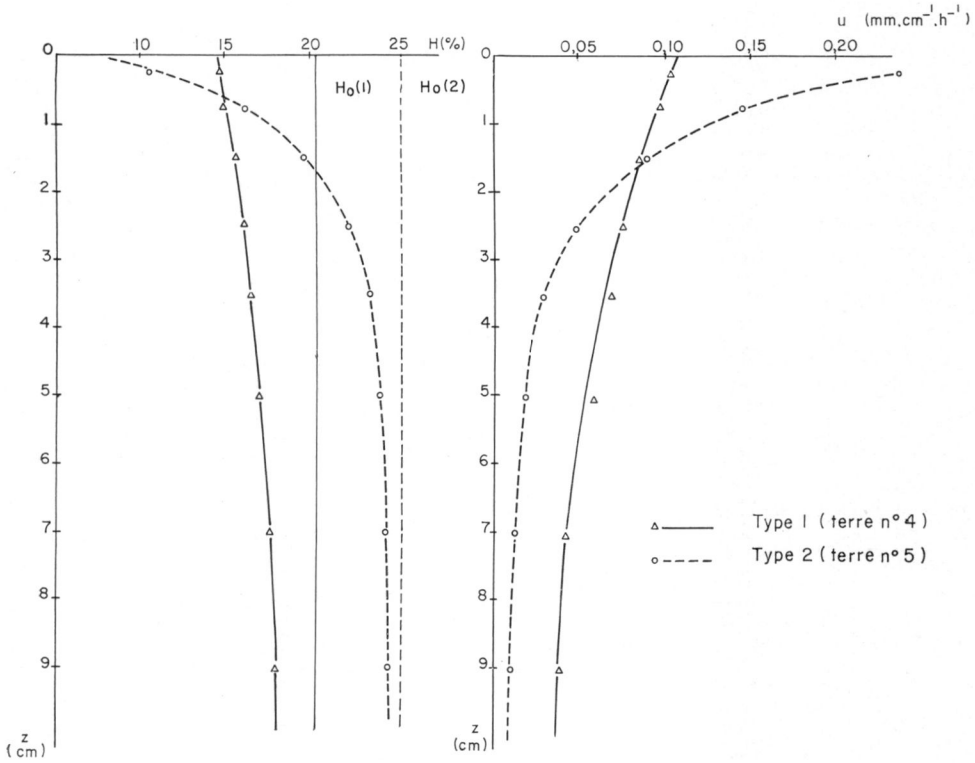


FIG. 1. — *Profils hydriques et courbes* u(z)

On peut également considérer les quantités d'eau perdues par le sol et exprimées en mm par tranche de un centimètre et par unité de temps (heure). Les courbes $u(z)$ (fig. 1) indiquent aussi les différences de comportement des deux échantillons.

Ces observations constituent le point de départ de notre étude dans laquelle nous nous proposons de rechercher un mode de classement des terres selon la forme de leurs profils hydriques obtenus dans les conditions déjà indiquées.

III. — MÉTHODE D'ÉTUDE ET D'INTERPRÉTATION

1° *Coefficient de diffusivité D — Obstacles à son utilisation*

Pour apprécier la mobilité de l'eau non saturante dans une terre donnée, on pourrait calculer le débit q d'eau traversant la section située au niveau z perpendiculairement à la direction de l'écoulement et le rapporter au gradient d'humidité $d\mathrm{H}/dz$ existant au même niveau. Le rapport $\dfrac{q}{d\mathrm{H}/dz}$

n'est autre que le coefficient de diffusivité D défini à partir des travaux de BUCKINGHAM (1907). Il est apparu, en fait, que D ne peut être regardé comme une constante. Il varie d'abord avec l'humidité H comme l'ont signalé STAPLE et LEHANE (1954), KLUTE (1956) et GARDNER (1958). HALLAIRE (1963) l'a également vérifié avec un dispositif expérimental analogue au nôtre. Mais, de plus, la relation de proportionnalité :

$$q = \mathrm{D}\,\frac{d\mathrm{H}}{dz} \tag{1}$$

à une humidité constante, ne semble pas observée dans tous les cas (SWARTZENDRUBER, 1963 ; HADAS, 1964). Enfin, dans des expériences de dessèchement du sol, HALLAIRE et HÉNIN (1958) ont noté que le coefficient de diffusivité dépend de la durée de l'expérience.

Dans ces conditions, en raison des nombreux facteurs susceptibles de faire varier le coefficient de diffusivité D, nous avons recherché un autre moyen d'expression susceptible de caractériser la mobilité de l'eau dans un échantillon de sol donné, pour faire une comparaison du comportement de différentes terres. Dans ce but, nous nous proposons d'étudier la forme des profils hydriques obtenus.

2° *Représentation des profils observés par une équation d'ajustement*

HALLAIRE (1963) a indiqué l'allure de la variation de u en fonction de la profondeur z dans le cas d'un sol soumis à l'évaporation et pour la phase initiale de celle-ci.

Les équations des courbes, d'allure exponentielle, peuvent se mettre sous la forme :

$$z = a \log u + b \tag{2}$$

dans lesquelles a et b sont des constantes.

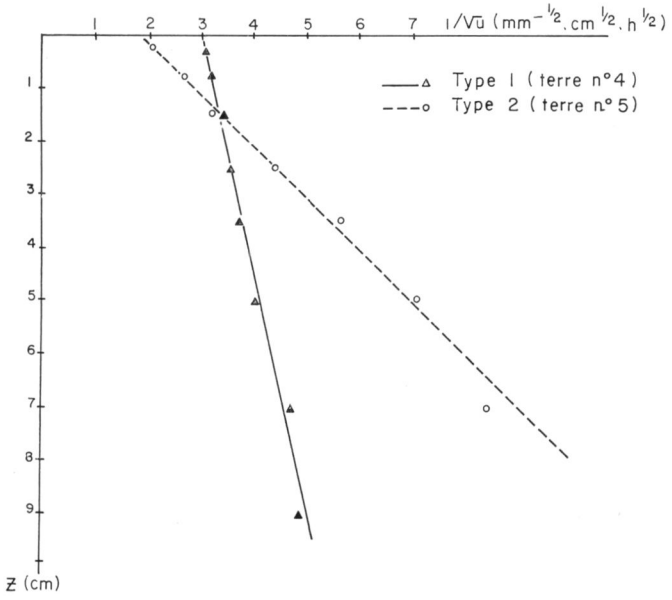


FIG.. 2. — *Variation de* $\frac{1}{\sqrt{u}}$ *en fonction de la profondeur* z

En réalité, le même auteur a observé dans le profil une rupture de pente amenant à considérer deux valeurs pour chacune des constantes. Nous avons cherché s'il n'était pas possible de mettre en

évidence un ajustement empirique caractérisant l'ensemble d'un profil donné et valable pour toutes les terres étudiées. Nous sommes ainsi arrivés à la relation suivante :

$$u = \frac{\alpha^2}{(z + \beta)^2} \tag{3}$$

que l'on peut mettre également sous la forme :

$$z = \frac{\alpha}{\sqrt{u}} - \beta \tag{4}$$

où α est une constante pour un profil hydrique donné,

et $\beta = \frac{\alpha}{\sqrt{u_s}}$, u_s étant la valeur de u à la surface.

Si l'on pose $\frac{1}{\sqrt{u}} = x$, cette fonction devient linéaire en x et s'écrit :

$$z = \alpha x - \beta$$

et la droite représentative a pour pente α. La détermination de cette valeur revient donc à calculer la pente d'une droite (fig. 2).

Pour chacune des terres étudiées, les points s'alignent généralement selon l'équation 4, exception faite, parfois, pour la partie voisine de l'extrémité inférieure. Mais ce cas se présente le plus souvent dans les profils de type 2 (fig. 2) où la détermination des valeurs de u, qui sont très faibles en profondeur, peut être entachée de grosses erreurs relatives et n'a plus beaucoup de signification.

Signalons que quelques essais ont été réalisés en opérant avec des tubes de 30 cm de longueur. On aboutit sensiblement aux mêmes conclusions qu'avec les tubes de 10 cm.

3° *Utilisation de l'indice* α

Il apparaît que la valeur de la pente α est en rapport évident avec la mobilité de l'eau à l'intérieur de la colonne de terre. Ainsi, le profil de type 1 décrit précédemment se caractérise par une grande pente α (fig. 2). Nous avons vu que dans ce cas, les transferts de l'eau se réalisent d'une façon importante sur l'ensemble du profil. Au contraire, avec le type 2, α est beaucoup plus faible. Dans ces conditions, la forme du profil indique que la migration ascendante de l'eau est difficile ou que sa mobilité dans le sol étudié est faible.

Ainsi, à partir de considérations très simples, on est amené à penser que ce paramètre peut caractériser la mobilité de l'eau dans un sol soumis à l'évaporation.

Ajoutons que α^2 a les dimensions du coefficient de diffusivité D, à savoir L^2T^{-1}.

D'autre part, l'utilisation de la pente α présente les avantages suivants :

— elle permet de caractériser un profil hydrique soumis au dessèchement,

— sa détermination est relativement simple,

— enfin, pour une terre donnée, comme nous le constaterons expérimentalement par la suite, α dépend de la porosité et de l'humidité initiale, mais à la différence de D, varie généralement peu avec le temps, c'est-à-dire avec l'état de dessiccation du profil (tabl. 1). A cette observation, il y a lieu, cependant, de faire deux restrictions. D'abord, il semble que si l'on part d'une humidité initiale relativement élevée (par exemple de la capacité au champ), l'indice α peut présenter des variations (terre n° 2, tabl. 1). Ensuite, au-delà d'une certaine durée d'évaporation, l'ajustement :

$$z = \frac{\alpha}{\sqrt{u}} - \beta \tag{4}$$

n'est plus vérifié. En effet, les couches supérieures du profil étant déjà fortement desséchées, sont le siège d'une diffusion sous phase gazeuse prédominante (COLLIS GEORGE et *al.*, 1963) et enfin la dessiccation cesse quand il y a équilibre entre l'humidité de l'air et l'humidité de la terre. Le profil hydrique peut alors changer de forme dans sa partie supérieure, et présenter une partie dont la concavité est tournée vers le haut. Pour tenir compte de ces observations, nous n'avons pas, généralement, prolongé la durée de nos essais au-delà de 8 h.

Ainsi, pour les raisons que nous venons d'énoncer, nous avons préféré utiliser la pente α dans la suite de notre étude. La détermination expérimentale de celle-ci permet de comparer le comportement de différents sols à cet égard. Il suffit de se fixer une porosité et une humidité initiale convenables, de façon à se placer dans des conditions aussi comparables que possible pour tous les échantillons.

TABLEAU I

Variations de α avec la dessiccation du profil

(mêmes conditions d'évaporation : $t = 40°C$ et degré hygrométrique de 25 à 30 p. 100)

N° terre	P_t Porosité totale (%)	H_0 Humidité initiale (%)	Durée d'évaporation (h)	Poids d'eau évaporée (g)	α $mm^{1/2} \cdot cm^{1/2} \cdot h^{-1/2}$ (1)
1	42,3	6 (≃ 3/4 c. c.)	2	0,77	0,8
			3	1,16	1,0
			6	1,66	0,9
			8	2,07	0,9
2	42,3	17,1 (≃ c. c.)	2	1,46	3,8
			4	2,66	5,7
			8	6,58	8,1
			16	12,34	6,4
2	42,3	12,5 (≃ 3/4 c. c.)	2-15′	1,16	2,1
			3-15′	1,76	2,3
			5-15′	3,74	2,3
			7-45′	4,72	2,3
4	44,3	15,80 (≃ 3/4 c. c.)	3	1,70	2,1
			5	2,75	2,0
			8	4,83	2,1
			24	9,38	2,1
5	53,8	25,4 (≃ c. c.)	4	2,11	0,6
			8	3,12	0,7
			14	5,72	0,7

(1) L'équation de dimensions de α est la racine carrée d'une hauteur d'eau (mm) × une épaisseur de sol (cm) par un temps (heure). Plus simplement, en utilisant les mêmes unités de longueur, elle deviendrait : $LT^{-1/2}$.

IV. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX INDIQUANT LES VARIATIONS DE α EN FONCTION DES FACTEURS DÉPENDANT DES ÉCHANTILLONS ÉTUDIÉS

Les essais permettant de déterminer α ont porté sur six terres présentant une large gamme texturale et dont l'analyse granulométrique et les caractéristiques hydriques sont indiquées au tableau 2. Les résultats obtenus permettent de déterminer les facteurs influant sur l'indice α.

Nous n'étudierons pas les variations de β qui présentent moins d'intérêt que celles de α. En effet, pour α constant, les valeurs de $B = \frac{\alpha}{\sqrt{u_s}}$ n'interviennent pas sur la forme du profil, mais seulement sur sa position.

TABLEAU 2

Analyse granulométrique et caractéristiques hydriques des terres testées

Texture (1)	N° 1 Sables	N° 2 Sables limoneux	N° 3 Limons sableux	N° 4 Limons argilo-sableux	N° 5 Argiles sableuses	N° 6 Argiles limono-sableuses
Analyse granulométrique en %						
Argile < 2 µ	3,75	10,75	11,50	19,50	31,50	36,25
Limon 2 µ — 20 µ	4,25	13,75	31,00	31,00	13,75	17,75
Sables 20 — 50	3,90	15,90	37,90	31,70	9,80	13,20
50 — 100	4,00	10,60	6,90	6,70	5,90	4,00
100 — 200	6,70	19,20	2,30	1,60	4,40	2,60
200 — 500	37,60	15,80	3,80	4,80	15,30	6,40
500 — 1 000	28,20	6,80	1,00	1,80	7,10	4,40
1 000 — 2 000	7,90	2,60	0,30	0,80	3,00	2,00
Matière organique en %	1,44	1,70	1,88	1,18	3,84	6,17
Humidité à 105°	0,46	0,93	1,57	2,39	5,01	7,17
Caractéristiques hydriques						
Capacité au champ (2) (Méthode FEODOROFF) en %	8	15	21,5	21	26	35
Humidité à pF 4,2	1,5	3,5	5,5	7	13	19
Humidités utiles	6,5	11,5	16,0	14	13	16

(1) D'après la classification de H. MALTERRE et M. ALABERT, 1963.
(2) La capacité au champ est déterminée par la méthode FEODOROFF et BÉTRÉMIEUX, 1964.

1° *Influence de la porosité*

Les terres étudiées ont été testées à trois porosités différentes et à une humidité généralement voisine de celle de la capacité au champ. Le temps d'évaporation a été de 8 h pour tous ces essais. La porosité la plus faible a été obtenue par un tassement maximum, la porosité moyenne par un tassement modéré, et enfin, la porosité la plus élevée correspond aux échantillons n'ayant subi aucun tassement.

Les valeurs de α sont d'autant plus faibles que la porosité est plus élevée (tabl. 3) ; la circulation de l'eau est donc moins bonne quand les terres ne sont pas tassées et ceci quelle que soit leur texture. Cependant, il faut noter qu'il y a généralement peu de différence entre un échantillon très tassé et un échantillon qui l'est modérément. Par contre, la valeur de α trouvée dans l'échantillon non tassé est pour certaines terres (nos 2 et 3) sensiblement inférieure à celle des deux autres. D'autre

part, dans ce dernier cas, la relation :

$$z = \frac{\alpha}{\sqrt{u}} - \beta \qquad (4)$$

est généralement moins bien respectée.

TABLEAU 3

Influence de la porosité sur les valeurs de α

N° des terres	Humidité initiale H_0	Densité apparente σ	Porosité totale P_t	α
1	8,2	1,60	38,5	2,5
		1,45	44,2	2,0
		1,35	48,0	1,6
2	17,8	1,65	36,6	8,1
		1,50	42,4	7,8
		1,09	58,1	6,0
3	22,3	1,60	38,5	7,1
		1,45	44,2	6,7
		0,90	65,4	2,1
5	25,4	1,40	46,2	0,9
		1,25	52,0	0,8
		0,75	71,2	0,5
6	32,0	1,25	52,0	0,6
		1,10	57,7	0,5
		0,69	73,5	0,5

2° *Influence de l'humidité initiale* H_0

Chacune des terres testées a été amenée à des humidités initiales variables dont les plus basses sont voisines de la moitié de la capacité au champ, et les plus élevées dépassent plus ou moins nettement cette valeur (de 50 p. 100 pour la terre sableuse n° 1 et 13 p. 100 pour la terre argilo-sableuse n° 5) (fig. 3). Toutefois, pour les fortes humidités, les résultats ne sont pas toujours reproductibles et il ne faut pas accorder un trop grand crédit à cette partie de la courbe (en pointillé sur la figure), sauf peut-être pour les terres argileuses. Aux faibles humidités, au contraire, l'allure des profils hydriques ne suit plus la relation que nous avons énoncée, et c'est pourquoi il est impossible de tester des échantillons au-dessous d'une humidité correspondant approximativement à la moitié de la capacité au champ.

Dans toutes les terres analysées, α diminue au fur et à mesure que l'humidité initiale de l'échantillon décroît (fig. n° 3). Cette diminution est très rapide pour les terres sableuses, sablo-limoneuses et limoneuses (n°s 1, 2, 3, 4), lente pour les

terres argileuses (nos 5 et 6). De plus, pour les terres sablo-limoneuses et limoneuses (nos 2, 3 et 4), les courbes présentent un palier ou même semblent passer par un maximum dont l'humidité est, en général, légèrement supérieure à celle de la capacité au champ. Au contraire, pour la terre sableuse (no 1), l'ascension prononcée de la courbe se prolonge nettement au-delà de la capacité au champ. Il en est de même pour les terres argileuses (nos 5 et 6), mais l'ascension est plus lente.

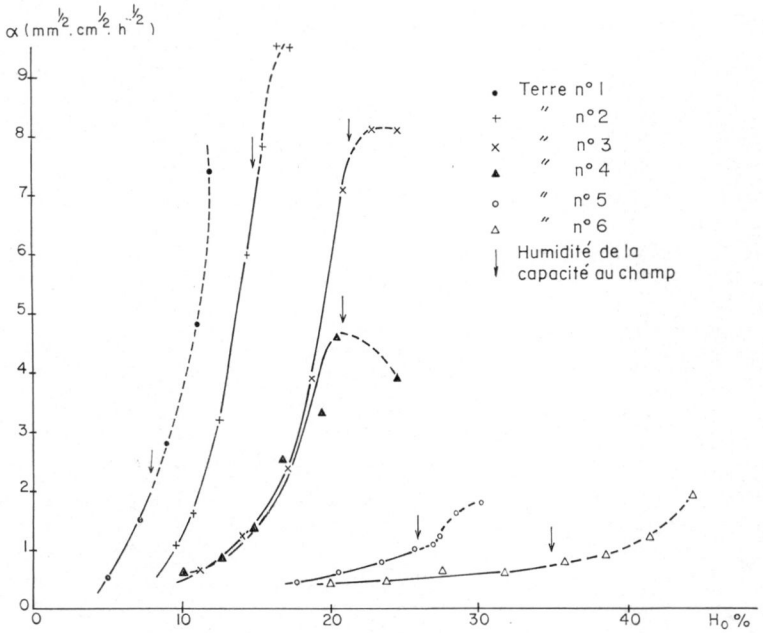


FIG.. 3. — *Influence de l'humidité initiale H_0 sur la valeur de l'indice α*

3° *Comparaison entre les influences de l'humidité initiale et de la porosité*

Puisque l'indice de diffusivité α varie, à la fois en fonction de l'humidité initiale et de la porosité, donc de la densité apparente, il est possible de comparer l'action de ces deux facteurs en se référant, par exemple, à l'humidité volumique initiale Hv_0 donnée par la relation :

$$Hv_0 = \sigma H_0 \qquad (5)$$

La figure 4 indique que la courbe n° 1 (H_0 variable et σ constant) présente une ascension beaucoup plus rapide que la courbe n° 2 (σ variable et H_0 constant) Il en résulte que l'humidité initiale H_0 joue un rôle prépondérant par rapport à la porosité.

4° *Comportement des différentes terres — Influence de la texture*

Comme nous l'avons déjà souligné, la comparaison du comportement de différentes terres exige que l'on travaille sur des échantillons dont la porosité et l'humidité initiales soient fixées d'une façon convenable. En ce qui concerne la porosité, il est

assez logique de la choisir égale à celle du sol en place. L'humidité initiale est plus délicate à fixer d'autant plus qu'elle influence fortement les résultats. Tout en faisant la part du côté arbitraire de ce choix, nous avons opté pour l'humidité correspon-

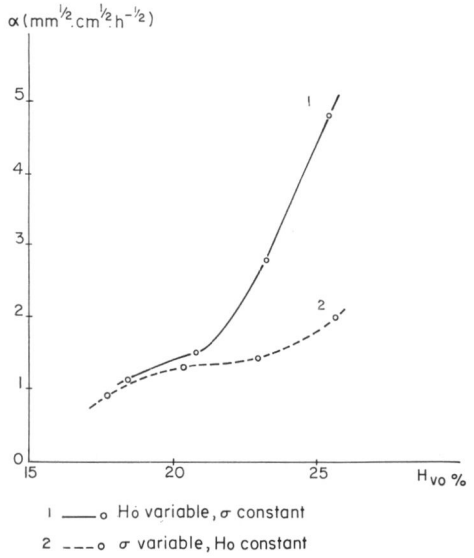


FIG. 4. — *Comparaison entre l'influence de l'humidité initiale H_0 et celle de la densité apparente* σ sur α

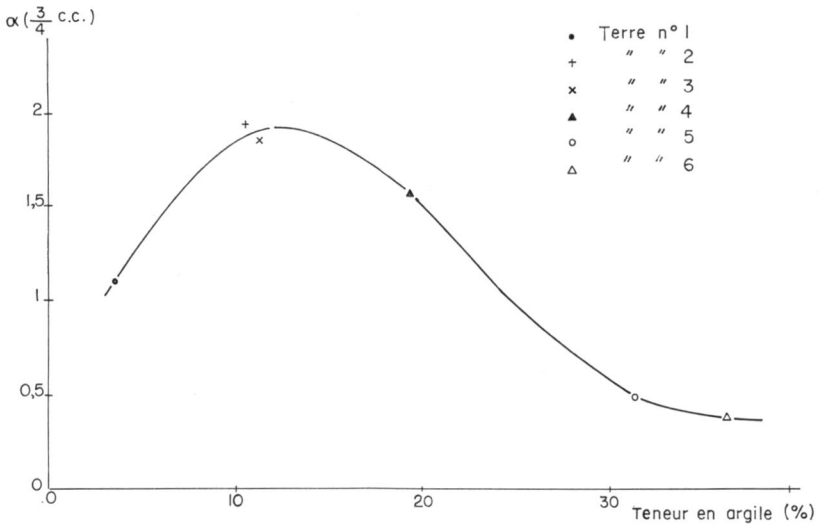


FIG. 5. — *Variation de* α (3/4 c. c.) *en fonction de la teneur en argile*

dant aux trois quarts de la capacité au champ. Ainsi, nous éliminons les conditions extrêmes : capacité au champ et point de flétrissement permanent, et nous nous en tenons à une humidité située environ au milieu de la gamme intéressant l'alimentation hydrique des plantes.

De la comparaison des différentes terres, il ressort que la texture a une très grande importance sur les valeurs obtenues qui sont faibles pour les terres argileuses, moyennes pour la terre sableuse, élevées ou très élevées pour les terres limoneuses ou sablo-limoneuses. La courbe de la figure 5 indique les variations de α (correspondant à $H_o = 3/4$ de la capacité au champ) en fonction de la teneur en argile des échantillons. Il ne s'agit, en fait, que d'une corrélation approchée, car il est évident que d'autres facteurs, qui ne sont pas mis en évidence, doivent intervenir :

répartition granulométrique des éléments autres que l'argile,
teneur en matière organique,
nature minéralogique de l'argile,
structure, etc...

V. — APPLICATIONS DE L'INDICE α

1° *Alimentation en eau des plantes.*
Essais réalisés avec de jeunes plantules d'orge.

Les terres, amenées environ à l'humidité de la capacité au champ, sont tassées à l'intérieur de récipients parallélépipédiques en matière plastique, de façon à obtenir une porosité moyenne aussi homogène que possible. Auparavant, des graines d'orge

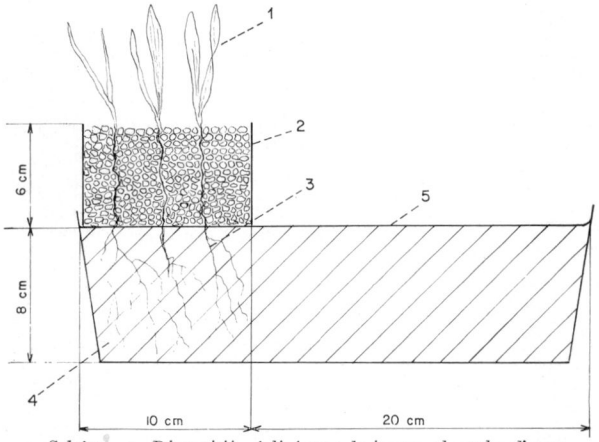


Schéma 1. *Dispositif réalisé avec de jeunes plantules d'orge*
1 : Plantules d'orge
2 : Boîte sans fond remplie de quartz broyé
3 : Racines d'orge
4 : Récipient rempli de terre humide
5 : Couvercle

ont été mises à germer sur un substrat inerte (quartz broyé), arrosé de solutions nutritives, et placé dans une boîte privée de fond suivant la technique de De Ment et *al.* (1959). Lorsqu'un feutrage de racines s'est suffisamment développé — huit jours environ — on dépose ces boîtes à l'une des extrémités des récipients remplis de terre humide de façon à mettre les racines en contact avec cette dernière. La

partie supérieure restante est hermétiquement bouchée par un couvercle de façon à y interdire toute évaporation (schéma 1). L'essai ne dure qu'une huitaine de jours, car pendant cette période courte, les racines d'orge pénètrent dans le volume de terre situé au-dessous des boîtes sans avoir le temps d'explorer l'autre zone. Elles y puisent l'eau nécessaire au développement des plantes et créent ainsi un « appel d'eau » se répercutant plus ou moins jusqu'à l'autre extrémité des récipients. Ces essais ont été réalisés simultanément pour toutes les terres, de façon à les placer dans les mêmes conditions. De plus, des précautions ont été prises pour empêcher autant que possible l'apparition de gradients de température au sein de la masse de terre et ainsi éviter les circulations d'eau par diffusion en phase vapeur ; c'est ainsi que les récipients étaient placés dans un bain d'eau pour uniformiser la température et que la partie supérieure, non recouverte par la boîte sans fond, était protégée, grâce à une feuille de carton blanc, de l'action directe des rayons solaires. A la fin de l'essai, la terre est découpée en tranches de façon à construire le « profil hydrique horizontal » ainsi obtenu.

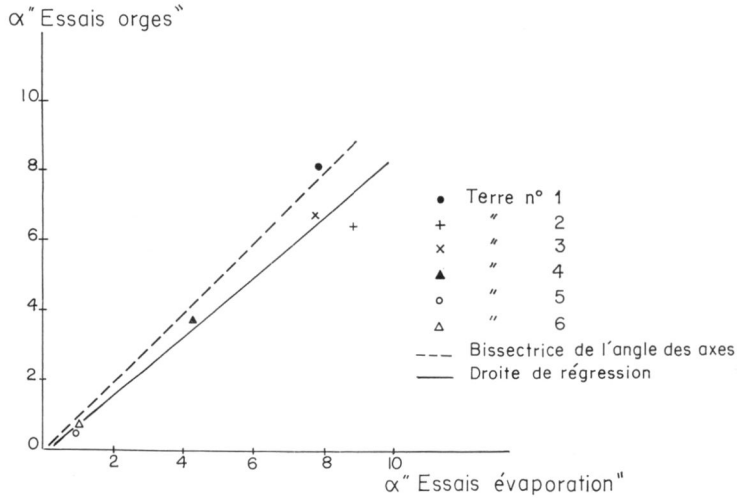


FIG.. 6. — *Comparaison entre les résultats obtenus dans les « essais évaporation » et ceux dans les « essais orge »*

L'interprétation a été réalisée en calculant α de la même façon que pour les essais en tubes, et en prenant l'heure comme unité de temps. La comparaison des résultats obtenus dans les deux séries d'essais, se lit sur la figure 6, chaque point représentant les deux valeurs de α trouvées pour une même humidité initiale et une même porosité. Compte tenu des différences de conditions de travail, la corrélation est très satisfaisante, puisque la distribution des points peut être ajustée à une droite de régression et que celle-ci est assez voisine de la bissectrice de l'angle des axes.

2° *Mesure de l'évaporation cumulée en atmosphère contrôlée*

Pour apprécier l'incidence de la circulation de l'eau, estimée par l'indice α, sur l'évaporation cumulée, nous avons effectué les essais suivants :

Les échantillons de terre, portés à l'humidité de la capacité au champ et tassés dans des tubes cylindriques de 30 cm de long et de 4,1 cm de diamètre de façon à

obtenir une porosité moyenne, sont placés dans une étuve à une température de 30°C et aux conditions hygrométriques réalisées dans les premiers essais. La surface de la terre, soigneusement arasée, affleure au bord supérieur du tube et est soumise à l'évaporation. Les échantillons sont pesés régulièrement de façon à enregistrer les pertes par évaporation. Les résultats obtenus indiquent que les valeurs des réserves d'eau utiles interviennent dans l'intensité d'évaporation. On obtient ainsi une relation linéaire d'ajustement entre α (3/4 c. c.) et le pourcentage d'eau évaporée par rapport à la réserve d'eau. Nous avons figuré sur la figure 7 deux droites de régression correspondant, l'une aux pertes d'eau après deux jours d'évaporation, et l'autre après six jours. Dans ce dernier cas, le coefficient de corrélation est aussi élevé que dans le premier ($r = 0{,}97$) bien que les mouvements de l'eau se fassent, sans doute partiellement en phase vapeur, au voisinage de la surface évaporante.

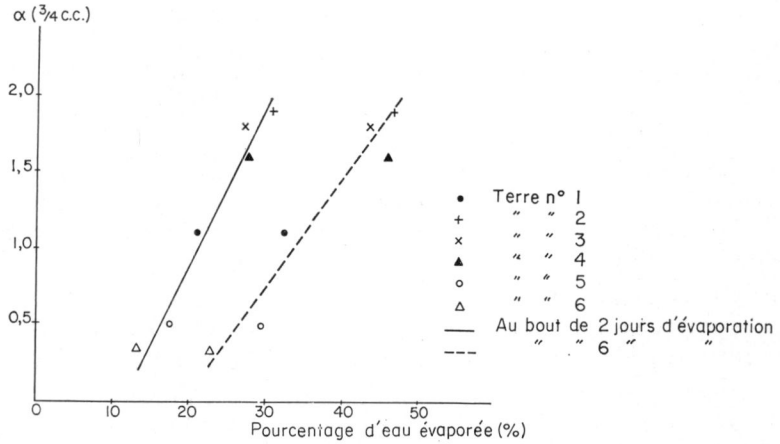


FIG. 7. — *Relation entre* α (3/4 c. c.) *et le pourcentage d'eau évaporée*

Ces représentations nous montrent que les réserves s'épuisent le plus vite dans les terres sablo-limoneuses et limoneuses (nos 2, 3, 4), lorsque l'on a affaire uniquement à un phénomène d'évaporation. Les argiles (nos 5 et 6) ont un comportement beaucoup plus économique. Enfin, la terre sableuse (n° 1) occupe une position intermédiaire mais il faut ajouter que ses réserves sont beaucoup plus faibles que celles des cinq autres (VERNET A., 1963).

CONCLUSIONS

La distribution des humidités le long de colonnes de terre après évaporation en atmosphère contrôlée et dans les conditions isothermes, nous a permis de calculer un indice α caractérisant la circulation de l'eau dans un sol non saturé et en régime de dessèchement, pourvu que l'on se place à l'intérieur des limites d'humidité précisées plus haut. A l'utilisation du coefficient de diffusivité D, nous avons préféré celle de l'indice α pour faire l'étude comparative du comportement de l'eau dans différents échantillons.

Pour une même terre, et pour des conditions d'évaporation données, la valeur de l'indice α ne dépend que de la porosité et de l'humidité initiale, ce dernier paramètre ayant une influence prépondérante. Signalons, au sujet de la porosité, que la circulation ascendante de l'eau semble moins rapide dans un sol non tassé. Ceci expliquerait que, dans certaines conditions, tout au moins, les façons superficielles, en augmentant la porosité et en limitant la circulation de l'eau, réduisent les pertes par évaporation (FEODOROFF A. et RAFI M., 1963).

Les valeurs de α déterminées à partir de sols très différents en se plaçant dans des conditions initiales d'humidité comparables (par exemple, 3/4 de la capacité au champ), permettent de noter la grande importance de la nature de la terre et particulièrement de la texture sur la circulation de l'eau. C'est ainsi que l'eau contenue dans une terre argileuse possède une mobilité plus faible que celle d'une terre limoneuse ou sablo-limoneuse. Dans ce dernier cas, le cheminement de l'eau vers les racines peut être relativement important surtout quand l'humidité se situe au voisinage de la capacité au champ.

Cette étude peut trouver son point d'application à deux niveaux :

— d'abord au niveau des racines pour l'étude de la disponibilité de l'eau aux plantes,

— ensuite, pour l'étude des pertes par évaporation au niveau du sol.

Une question vient alors à l'esprit : quelles sont les valeurs de α les plus favorables pour l'alimentation en eau des plantes quand on considère des sols à réserves en eau identiques ?

Au premier abord, il semble logique de penser aux terres présentant un indice α élevé (terres limoneuses et sablo-limoneuses) puisque l'eau cheminant rapidement jusqu'aux racines, l'alimentation hydrique des plantes s'en trouve améliorée. Si, par contre, on considère les pertes par évaporation au niveau du sol, les terres lourdes caractérisées par une pente α faible, semblent avoir un comportement plus « économique ». Ce cas se présente surtout lorsque la surface de sol nu est relativement importante (par exemple culture de plantes sarclées). Chaque type de sol peut ainsi présenter des avantages et des inconvénients et ceci semble dépendre en outre de la culture pratiquée. Enfin, il ne faut pas oublier, comme nous l'avons souligné au début de ce travail, que d'autres facteurs, comme l'enracinement et le pouvoir évaporant de l'air, interviennent dans les modalités d'alimentation en eau des plantes et peuvent compliquer singulièrement ce schéma.

Reçu pour publication en février 1967.

SUMMARY

INVESTIGATION ON THE CIRCULATION OF NON-SATURATING WATER IN SOILS WHICH ARE DRYING UP

The investigation relates to the ground water flow in soils which are drying up through surface evaporation and purports to make a comparative evaluation of the mobility of water in various soils.

Samples of moist soil are packed inside cylindrical tubes and subjected to evaporation in a

drying oven kept at the temperature of 40°C. This process yields geo-hydrological profiles from which the following relationship, between the drying rate u and the depth z, is empirically derived :

$$u = \frac{\alpha^2}{(z + \beta)^2} \qquad (3)$$

To evaluate the mobility of water in a given soil and make a comparative study of the mode of action of various soils, making use of the diffusion coefficient D is not satisfactory. The literature has emphasized, on many occasions, that this coefficient, far from being constant, is affected by many factors. This is why we prefer to use the slope α which is found to be a suitable index of the water's mobility and, for a given soil, only varies dependently with the initial porosity and moisture conditions.

The experimental data obtained with this method high-light the major role played by the soil characteristic, its texture especially, with regard to water circulation, when the soil is drying-up. Moisture being comparable, e. g., 75 per cent of the field capacity, the water circulates much less in a clayey soil than in silty or sandy-loam soils.

These observations may find their application when studying the water availabilty to plants and the evaporative phenomena at ground level. In both instances, the shape of the geo-hydrological profiles supplies information as to the mobility of ground water.

The amounts of water either evaporable or supplied to plants are connected with this mobility.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DES UMLAUFES DES NICHT SÄTTIGENDEN WASSERS IN VERSCHIEDENEN DER AUSTROCKNUNG AUSGESETZTEN BODEN

Das Ziel dieser Untersuchung besteht darin, die Wasserbewegung in einem in Austrocknung durch Oberflächenverdunstung befindlichen Boden zu erforschen und eine vergleichende Abschätzung der Wasserbewegung in verschiedenen Böden durchzuführen. Feuchte, in zylindrische Röhren gepresste Bodenproben werden in einer auf 40°C gehaltenen Dampfkammer der Trocknung unterworfen. Man erhält am Ende dieser Behandlung hydrische Profile, die nach empirischer Korrektion eine Definition gemäss folgender Beziehung zwischen Austrocknungs-geschwindigkeit u und Tiefe z herzustellen erlaubt :

$$u = \frac{\alpha^2}{(z + \beta)^2} \qquad (3)$$

Um die Wasserbeweglichkeit im Boden zu schätzen und um eine vergleichende Untersuchung des Verhaltens der verschiedenen Böden in dieser Hinsicht durchzuführen, genügt die Anwendung des Diffusivitätskoeffizienten D nicht. In der Tat, haben viele Autoren betont, dass dieser Parameter für einen bestimmten Boden keineswegs konstant ist, sondern mit zahlreichen Faktoren wechselt. Unter diesen Umständen, haben wir der Benutzung des Gefälles α, den Vorzug gege-ben, das sich als ein gültiger Index der Wasserbeweglichkeit zeigt, und das, für einen bestimmten Boden, nur mit den anfänglichen Porositäts-und Feuchtigkeitsbedingungen des Bodens variiert.

Die durch diese Methode erhaltenen experimentalen Ergebnisse zeigen die grosse Bedeutung der Bodenbeschaffenheit, und insbesondere der Bodenstextur, für den Wasserumlauf in der Austrocknungsphase. Für vergleichbare Feuchtigkeiten (z. B. : 3/4 der Feldkapazität) scheint das Wasser viel weniger mobil in einer tonigen Erde als in einer lehmigen oder sandiglehmigen Erde zu sein.

Was die Wasserversorgung der Pflanzen und die Verdunstungsphänomene in Bodenhöhe anbelangt, so können diese Beobachtungen ihre Anwendung finden. In diesen zwei Fällen gibt tatsächlich das Verhalten der aufgestellten hydrischen Profile Auskunft über die Wasserbeweglichkeit im Boden. Es besteht eine Beziehung zwischen dieser Charakteristik und der verdampfbaren oder für die Pflanze gelieferten Wassermengen.

Изучение передвижений ненасыщающей влаги в различных почвах с засушливым режимом.

Ж. МОРИЗЭ.

РЕЗЮМЭ

Автор поставил себе задачей изучить передвижения влаги в почве высыхающей от поверхностного испарения, и произвести сравнительную оценку подвижности влаги в разных почвах. Пробы влажной почвы, набитые внутрь цилиндрических трубок были подвержены испарению в термостате с постоянной температурой в 40°. После этой обработки были получены водные профили и их эмпирическое урегулирование дало возможность вывести следующее соотношение между скоростью высыхания и и глубиной Z : $u = \frac{\alpha^2}{(Z + \beta)^2}$ (3).

Применение коэффициента диффузности D — недостаточно для определения подвижности влаги в почве и чтобы провести сравнительное изучение поведения различных почв в этом отношении. И действительно, многие авторы подчеркивали уже, что этот параметр, далеко не постоянный для данной почвы, меняется в зависимости от многих факторов. Это заставило автора предпочесть применение уклона α который оказался подходящим признаком подвижности влаги, и который меняется для данной почвы, только, с изменением исходных условий порозности и влажности.

Экспериментальные данные полученные от применения этого метода указывают на исключительную важность природы почвы и, особенно, ее текстуры, на передвижение влаги в засушливый период. При равных влажностях (например : 3/4 полевой влагоемкости), влага кажется менее подвижной в глинистой почве чем в почве суглинистой, или песчано-суглинистой).

Эти наблюдения можно применить при изучении водного питания растений и явлений испарения на уровне почвы. В этих двух случаях конфигурация созданных водных профилей может дать сведения о подвижности влаги в почве. Расход влаги могущей испариться или быть предоставленной в распоряжение растения находятся в соотношении с этим характерным явлением.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BUCKINGHAM E., 1907. *U. S. Dept. agric. Bur. Soils Bull.*, **38**.

COLLIS GEORGE N., HÉNIN S., KELLY J. A., 1963. Étude du mécanisme de la dessiccation des sols par évaporation. *C. R. Acad. Sci.*, **257**, nº 1, 242-244.

DE MENT J. D., STANFORD G., BRADFORD B. N., 1959. A method for measuring short-term nutrient absorption by plants. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 47-50.

FEODOROFF A., RAFI M., 1962. Évaporation de l'eau à partir d'un sol nu. Les trois stades de l'évaporation. *C. R. Acad. Sci.*, **255**, nº 23, 3 220-3 222.

FEODOROFF A., RAFI M., 1962. Évaporation de l'eau à partir d'un sol nu. Évolution des profils hydriques. *C.R. Acad. Sci.* **255** nº 23, 3468-3470.

FEODOROFF A., RAFI M., 1963. Évaporation à partir d'un sol nu. *Ann. agron.*, **14** (4), 601-613.

FEODOROFF A., BÉTRÉMIEUX R., 1964. Une méthode de laboratoire pour la détermination de la capacité au champ. *Sci. Sol*, 2e sem., 109-118.

GARDNER W. R., 1958. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soil. *Highway Research board, S. R.*, **40**, 78-87.

HADAS A., 1964. Deviations from Darcy's Law for the flow of water in unsaturated soils . *Israel 5, agron. Res.*, **14**, 159-168.

HALLAIRE M., HÉNIN S., 1958. Dessèchement du sol et évolution des profils hydriques. *C. R. Acad. Sci.*, **246**, 2151-2153.

HALLAIRE M., BALDY C., 1963. Potentiel matriciel de l'eau dans le sol et tension superficielle de l'eau. *Ann. agron.*, **14** (4), 381-391.

HALLAIRE M., 1963. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. *Ann. agron.*, **14** (4), 393-428.

KLUTE A., BRUCE R. R., RUSSEL M. B., 1956. The application of the diffusivity concept to soil moisture movement. 6e *Congr. Sci. Sol.*, Paris, 1re commission, **5**, 345-352.

MALTERRE H.. ALABERT M., 1963. Nouvelles observations au sujet d'un mode rationnel de classement des textures des sols et des roches meubles. Pratique de l'interprétation des analyses physiques. *Bull. A. F. E. S.*, **2**, 76-84.

STAPLE W. Y., LEHANE J. J., 1954. Movement of moisture in unsaturated soils. *Canad. J. agric. Sci.*, **34**, 329-342.

SWARTZENDRUBER D., 1963. Non-Darcy behavior and the flow of water in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 491-495.

VERNET A., 1963. Évaporation de l'eau du sol. *Ann. agron.*, **15** (4), 587-600.

Ann. agron., 1967, **18** (3), 285-299.

RELATION ENTRE LE pH DU SOL ET LA MANIFESTATION DE LA CARENCE EN ZINC DU MAÏS DANS UN SECTEUR DU BASSIN DE L'ADOUR, POSSIBILITÉS ET LIMITES D'UN DIAGNOSTIC PAR L'ANALYSE DU SOL

A. DARTIGUES et E. LUBET

Station d'Agronomie et
Service d'Expérimentation et d'Information,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Ouest, 33 - Pont-de-la-Maye

SOMMAIRE

Une corrélation est établie entre la manifestation des symptômes de carence en zinc sur maïs, le pH du sol et le taux de zinc extractible à HCl concentré ou 0,2 N, pour de nombreux sols lessivés d'origine acide du Bassin de l'Adour. Un test applicable dans cette région est proposé pour servir de base à l'appréciation des besoins en zinc de ces sols, dans le cas de culture de maïs. La pauvreté quasi générale des sols en zinc doit faire envisager, dans la pratique agricole, l'emploi de zinc dans la fertilisation.

INTRODUCTION

Dans deux notes présentées en 1961 (ROUTCHENKO) et 1963 (DARTIGUES et *al.*), une grave déficience en zinc sur maïs était signalée dans le Sud-Ouest atlantique et les premiers résultats obtenus au cours d'expériences de traitement au champ étaient communiqués.

Le caractère limité de ces études n'avait pas mis en lumière les causes possibles de cette déficience, bien que certaines hypothèses fussent émises. Depuis lors et durant trois années d'observations, une cinquantaine de localités couvrant plus de

3 000 km² ont été prospectées au sud de l'Adour, où la carence en zinc sur maïs se fait plus particulièrement remarquer. Les sols, essentiellement en position de plateau, sont fortement lessivés et originellement acides, formés généralement de sables fins ou de limons plus ou moins sableux (1).

A l'extérieur de cette zone, un certain nombre de sols sableux, sur lesquels peuvent apparaître des carences de même nature, ont également été examinés.

Selon les informations recueillies sur le terrain, il est apparu que la pratique du marnage et du chaulage semblait avoir un rapport assez étroit avec l'extériorisation des symptômes de carence en zinc sur maïs. On sait que l'élévation marquée du pH du sol constitue l'un des facteurs de carence les plus fréquents aux U. S. A., où le phénomène a été le plus étudié ; ces déficiences, constatées sur différentes espèces végétales, se rencontrent surtout dans les sols dont le pH est compris entre 6 et 8, (CHANDLER, 1937 ; CAMP et *al.*, 1937 ; THORNE et *al.*, 1950 ; GREENWOOD et *al.*, 1951 ; SHAW et *al.*, 1952 ; LEEPER, 1952 ; WOLTZ et *al.*, 1953 ; WINTERS, 1955).

Le but de cette étude a été de rechercher, au moyen d'un nombre important d'observations et de mesures, une relation chiffrée entre la réaction du sol, sa richesse en zinc et l'apparition des signes de carence sur maïs.

On a voulu en même temps étudier les possibilités d'établissement d'un test chimique en vue d'apprécier l'aptitude de ces mêmes sols à pourvoir normalement aux besoins en zinc des plantes.

On a voulu enfin apporter quelques éléments supplémentaires à une étude d'ensemble visant à la recherche des causes de la déficience en zinc du maïs, après avoir tenté de préciser l'importance de certains facteurs connus pour favoriser également la déficience en zinc, par exemple : le taux élevé de matière organique dans le sol ou l'excès de phosphates. Dans ce but, de nombreuses mesures du taux de matière organique et du phosphore ont été effectuées et plusieurs dispositifs ont été expérimentés durant quatre années (2). On a pu constater que ni l'un ni l'autre de ces facteurs ne peut être considéré comme responsable de la carence dans ces sols.

MÉTHODES D'ÉTUDE

Le choix des sols soumis à l'échantillonnage s'est effectué, sinon au hasard, du moins avec, comme objectif, une dispersion suffisante dans des conditions de culture différentes, en préférant les situations où voisinaient dans un même champ des cultures présentant les symptômes plus ou moins accentués de la carence zincique et des cultures d'apparence normale. Le prélèvement des échantillons de sol a été fait au cours des mois de mai et juin de chaque année, en même temps que les observations précédentes. Les analyses effectuées concernent la partie du sol arable comprise entre 0 et 20 cm de profondeur, dans certains cas, entre 20 et 40 cm ou plus. Les pH ont été déterminés dans l'eau et dans KCl N (rapport terre sur solution = 1/2,5-agitation magnétique). Le dosage du zinc a été fait dans des extraits à l'acide chlorhydrique 0,2 M ou dans des extraits à l'acide chlorhydrique concentré pour la recherche des réserves totales (DARTIGUES, 1966).

(1) J. DELMAS et A. DARTIGUES (Travaux 1955-1962). Cartographie schématique des sols du département des Landes. Textures établies selon le diagramme de H. MALTERRE, 1961.

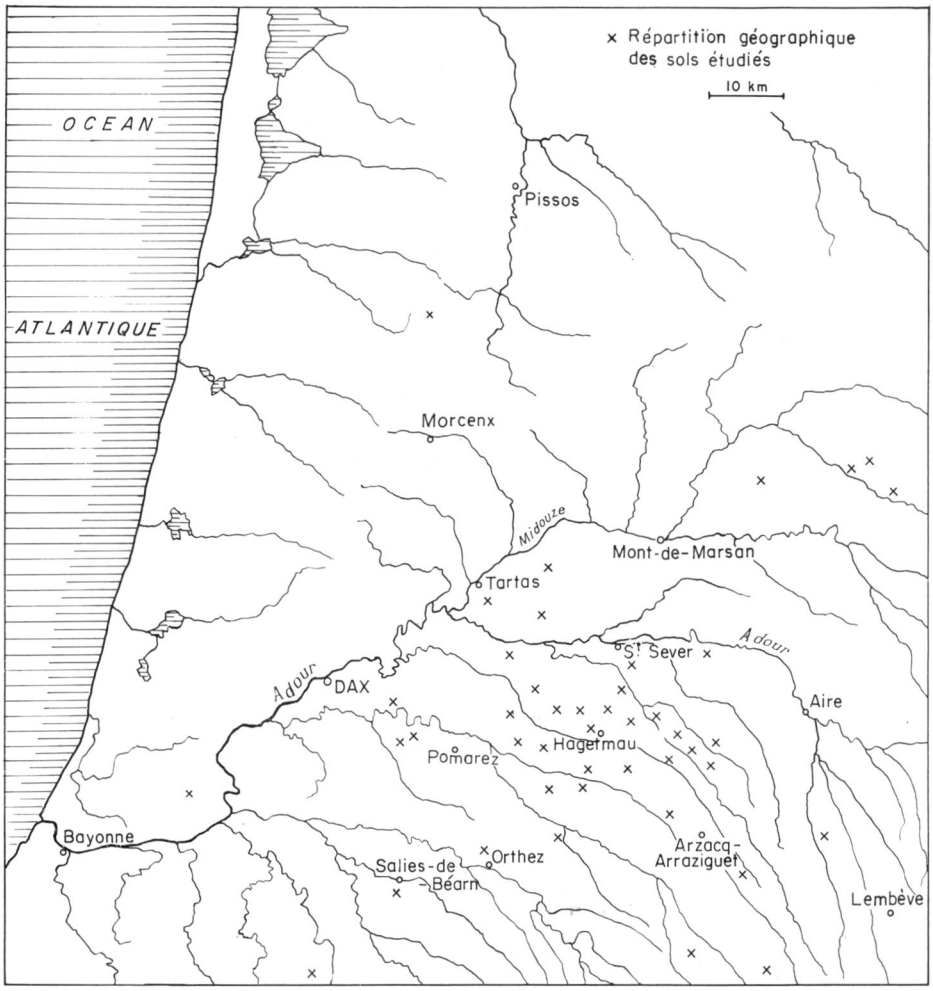
(2) Expérimentations au champ de cultures de maïs, en sols carencés en zinc : étude du rôle du phosphore. (Résultats en cours de publication.)

TABLEAU I

Commune et Département	Texture	Matière organique %	P_2O_5 ‰ (acide citr. 2 %)	pH		Zn extr. HCl 0,2 M	Zn sol. HCl concentré	Extérior. symptômes carence Zn	Amende-ments effectués
				Eau	KCl N				
Aubagnan (40)	L.	1,8	0,15	7,6	6,8	1,4	23,8	+	marnage
Doazit (40)	S. L. A.	1,7	0,11	6,65	5,95	1,4	24,8	+	chaulage
Hagetmau (40)	L. S. A.	2	0,18	7,3	6,7	2,5	26,3	+	marnage
Labastide-Armagnac (40)	S. L.	2,1	0,15	6,7	6	2,2	21,5	+	—
Leme (64)	A. L. S.	3,2	0,09	6,9	6,1	1,1	25,7	+	marnage
Saint-Palais (64)	L. S. A.	3,5	0,14	7,2	6,8	0,8	35	+	chaulage
Urgons (40)	L. S. A.	2,2	0,16	5,4	4,5	2,5	25,6	+ symptômes fugaces	—
Aubagnan (40)	L.	1,8	0,16	7,15	6,45	2,3	24,4	—	chaulage
Coudures (40)	S. L. A.	2	0,14	6,4	5,5	3,4	26,7	—	—
Gaillères (40)	S.	0,9	0,20	4,75	4	1,1	17,7	—	—
Malaussanne (64)	L.	3,6	0,17	6,4	5,65	3,4	51,9	—	—
Orthez (64)	L. S.	1,7	0,21	5,8	4,9	1,8	46,7	—	—
Saint-Sever (40)	L. S.	1,9	0,21	6,6	5,8	4,4	41,6	—	—
Tartas (40)	S.	2	0,08	6	4,8	0,7	23,6	—	—

Cent dix-huit sols de différentes origines constituent les éléments de la présente étude. Leur répartition géographique est indiquée sur la carte schématique ci-contre.

On trouvera dans le tableau 1 quelques exemples d'analyses.



SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS ET DES RÉSULTATS ANALYTIQUES

Les diagrammes 1, 2, 3, 4 contiennent l'ensemble des données analytiques. Pour chacun des sols étudiés, représenté en noir ou blanc suivant que le maïs a extériorisé ou non les signes de la carence en zinc, on a porté en abscisse le pH et en ordonnée la richesse en zinc exprimée en mg par kg de terre. Les sols dont on a acquis la certitude qu'ils ont été soit marnés soit chaulés sont indiqués par des signes dis-

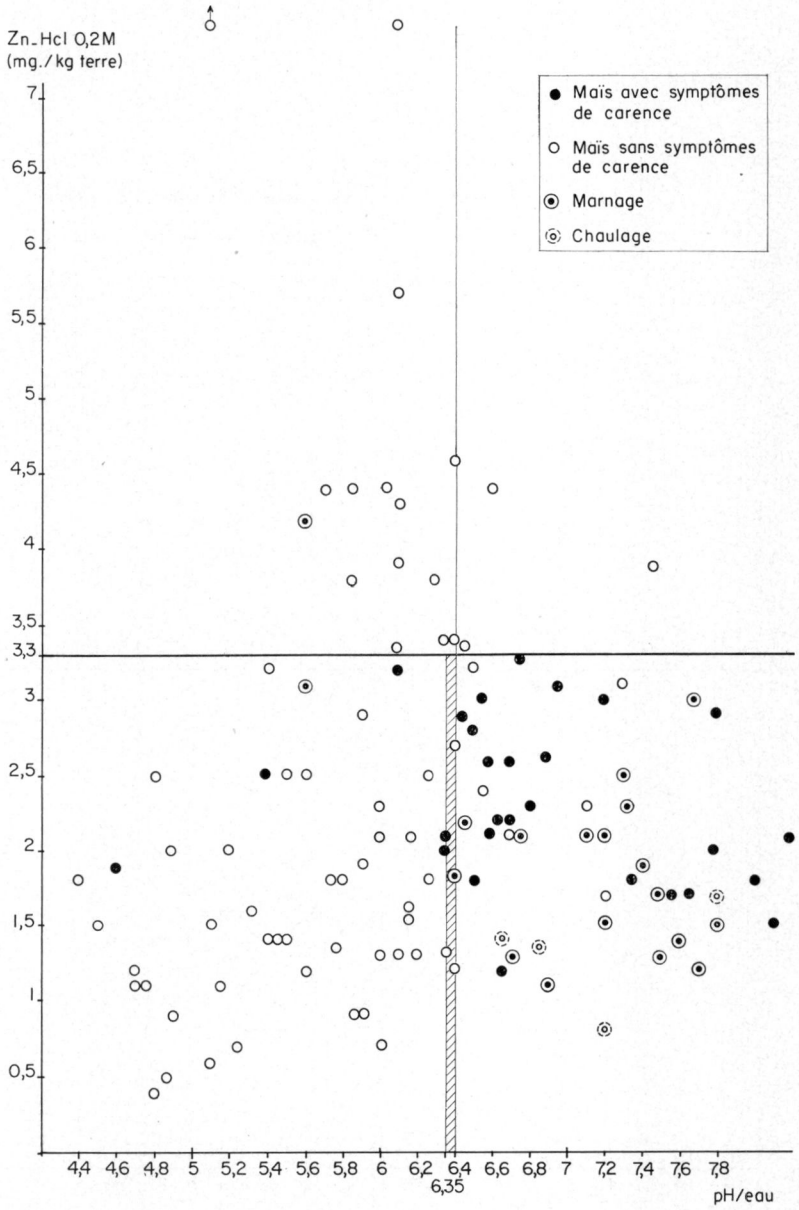


FIG. 1. — Répartition des sols d'après leur teneur en Zn extrait à HCl 0,2 M et leur pH eau.

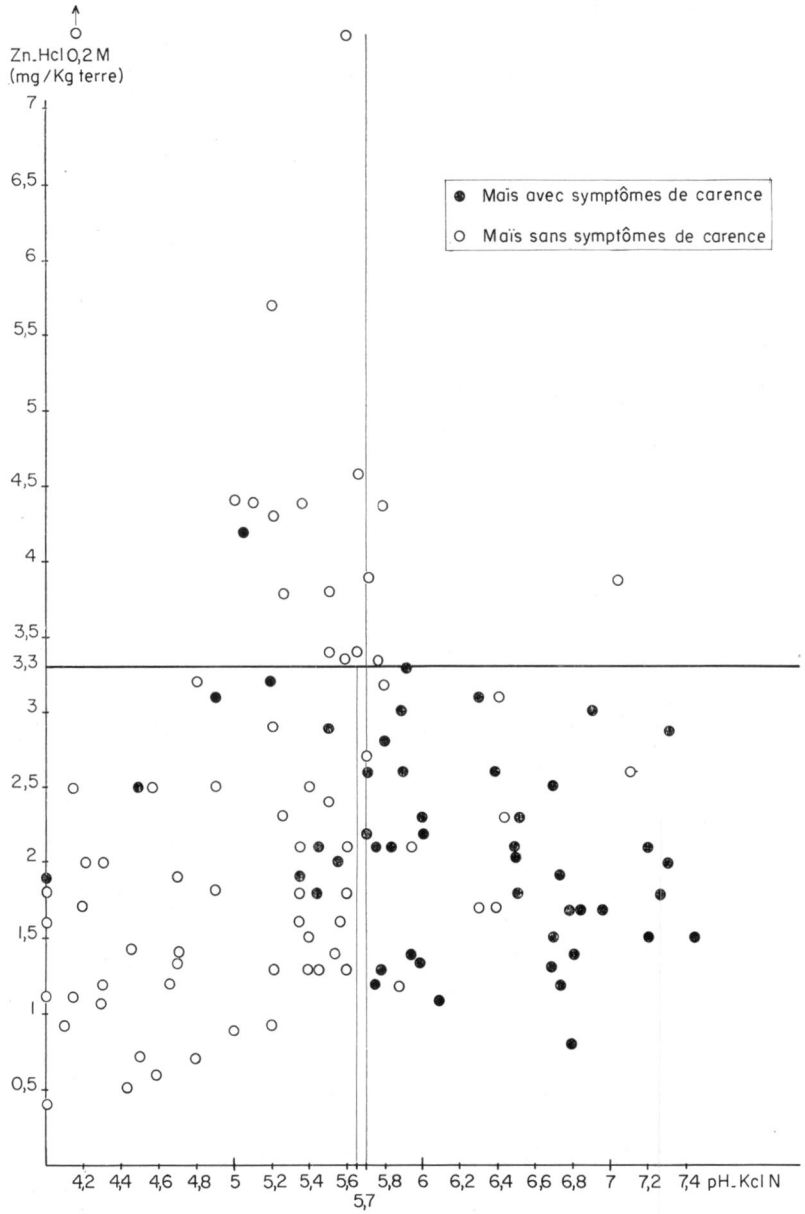


FIG. 2. — Répartition des sols d'après leur teneur en Zn extrait à HCl 0,2 M et leur pH KCl N.

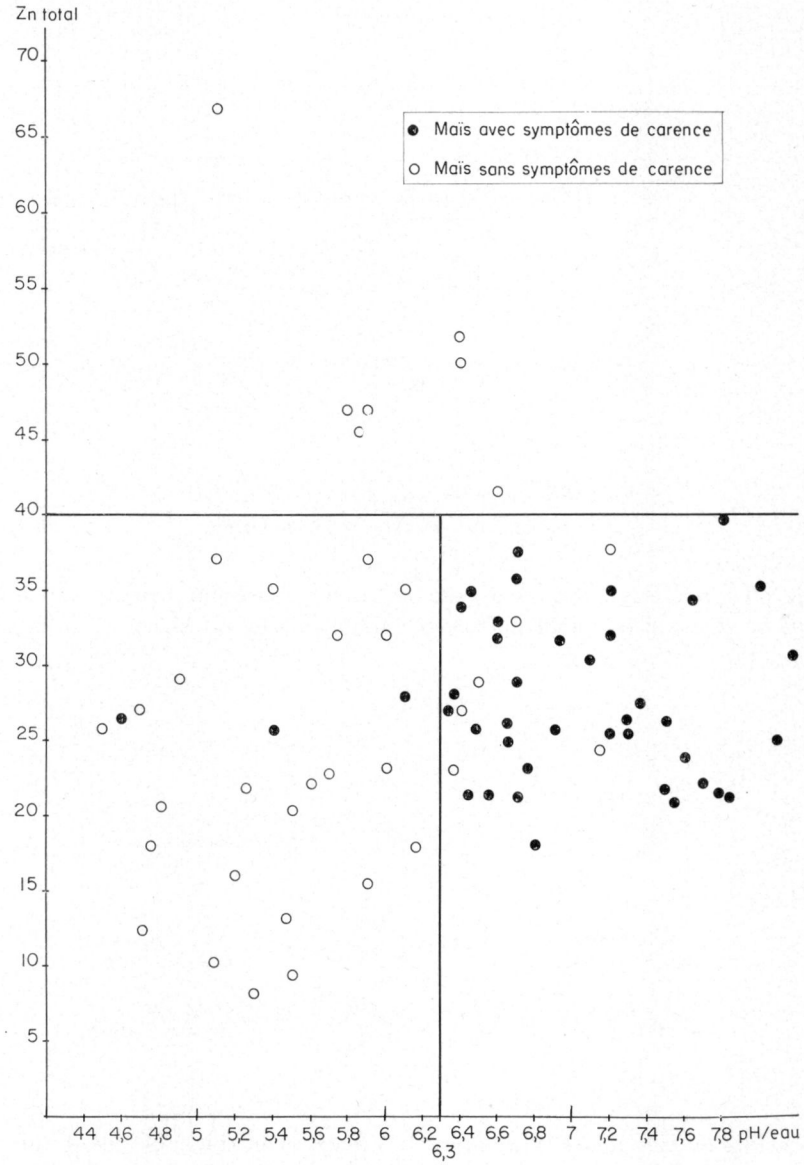


FIG. 3. — Répartition des sols d'après leur teneur en Zn total et leur pH eau.

tinctifs sur le diagramme 1, mais il faut admettre que tous les sols dont le pH est supérieur à 7 ont été chaulés ou marnés puisqu'ils sont originellement acides.

1° *Relations entre le pH du sol et la manifestation des signes de carence en zinc*

Ces relations découlent des graphiques 1 et 2 et sont indiquées dans le tableau 2 ; une zone de transition, située entre les pH-eau 6,35 et 6,4, a été laissée à l'écart de l'interprétation pour mieux marquer l'ensemble des autres résultats.

TABLEAU 2

pH-eau	pH-KCl N		
< 6,35		*91* % des plantes ont un développement normal (52 cas sur 57)	Diagnostic valable à *85,3* % pour tous les cas considérés dans les limites fixées (93 cas sur 109)
> 6,4		*79* % des plantes présentent des symptômes de carence (41 cas sur 52)	
	< 5,7	*85* % des plantes sont saines (56 cas sur 66)	Diagnostic valable à *81* % (92 cas sur 114)
	> 5,7	*75* % des plantes ont des symptômes de carence (36 cas sur 48)	

2° *Relations entre les taux de zinc extraits du sol et la manifestation des signes de carence*

On voit que la recherche d'un test de carence, basé uniquement sur le dosage chimique du zinc dans le sol à l'aide des techniques citées, est illusoire car la plupart

TABLEAU 3

Extrait de sol	Seuil	Probabilité pour que les symptômes de carence n'apparaissent pas au-delà du seuil
Zinc extrait par HCl 0,2 M	3,3 mg/kg	*94,5* % (17 cas sur 18) (118 sols analysés)
Zinc extrait par HCl concentré	40 mg/kg	*100* % (7 cas sur 7) (78 sols analysés)

des sols acides ou très acides contiennent des réserves en zinc très faibles, qui paraissent subvenir normalement aux besoins des plantes. Il convient néanmoins de souligner que dans ces conditions on peut supposer que de nombreux états subcarentiels peuvent exister sans pour autant être marqués par des signes de carence sur le maïs, mais qui contrarient le développement optimum des plantes.

Si la connaissance des réserves en zinc du sol ne peut mettre en valeur l'aspect dynamique des relations entre sol et plantes, elle peut cependant être en mesure de servir de base de diagnostic pour l'alimentation en zinc de ces plantes par la définition d'un seuil au-delà duquel il y a de fortes présomptions pour que les symptômes de carence n'apparaissent pas (tabl. 3).

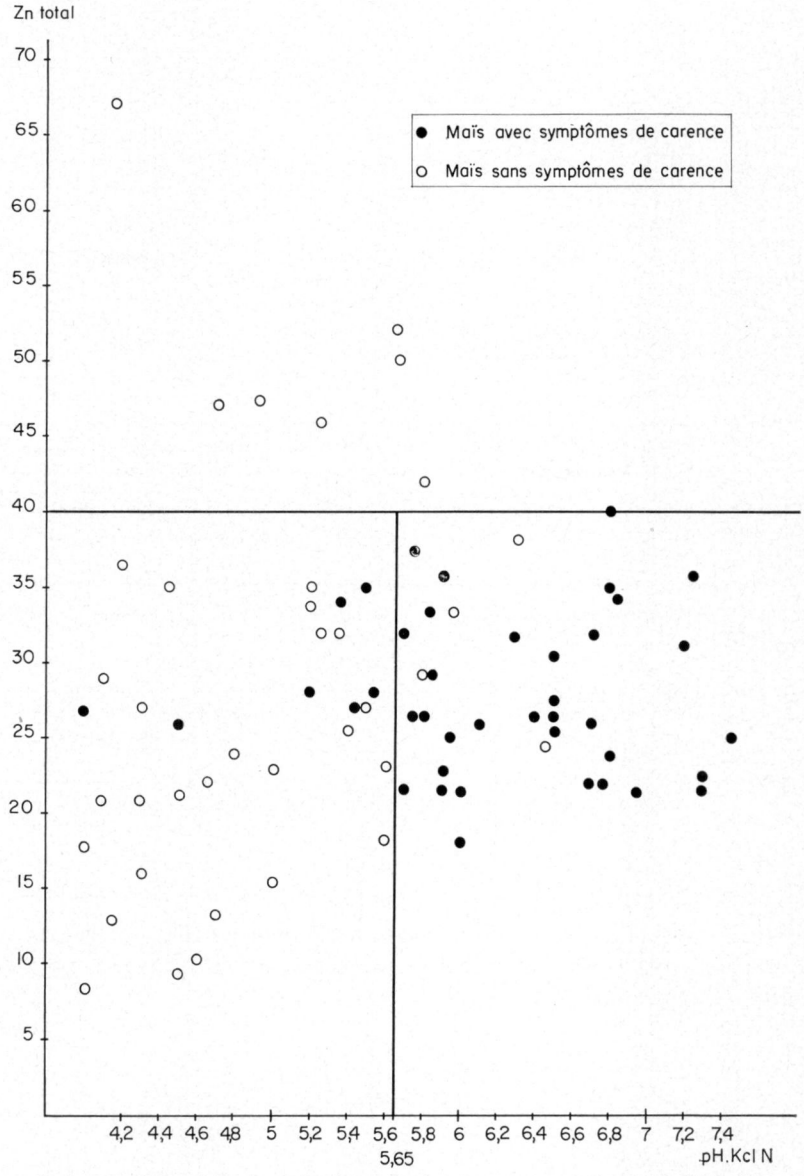


FIG. 4. — Répartition des sols d'après leur teneur en Zn total et leur pH KCl N.

3° *Relations faisant intervenir la manifestation des symptômes de carence, le pH du sol et le taux de zinc extrait par voie chimique*

Ces relations sont exprimées dans le tableau 4

TABLEAU 4

Zinc extractible par HCl 0,2 M	pH-eau		pH-KCl (N)	
	< 6,35	> 6,4	< 5,65	> 5,65
> 3,3 mg/kg	*Diagramme 1* — Pas de carence visible Dans 17 cas sur 18 = *94* %		*Diagramme 2*	
< 3,3 mg/kg	Pas de carence visible dans 41 cas sur 45 *91* %	Carence visible dans 41 cas sur 49 *84* %	Pas de carence dans 43 cas sur 52 *83* %	Carence dans 38 cas sur 48 *79* %
	Diagnostic valable à *88,5* % pour tous les cas considérés (99 sur 112)		Diagnostic valable à *83* % pour tous les cas considérés (98 sur 118)	
Zinc soluble dans HCl concentré	pH-eau		pH-KCl (N)	
	< 6,3	> 6,3	< 5,65	> 5,65
> 40 mg/kg	*Diagramme 3* — 4	Pas de carence Dans 7 cas sur 7 = *100* %	*Diagramme 4*	
< 40 mg/kg	Pas de carence dans 24 cas sur 27 *89* %	Carence dans 38 cas sur 44 *86* %	Pas de carence dans 26 cas sur 33 *79* %	Carence dans 34 cas sur 38 *89,5* %
	Diagnostic valable à *88,5* % pour 69 cas sur 78		Diagnostic valable à *86* % pour tous les cas considérés (67 cas sur 78)	

Remarque. — Avec l'examen de la zone inférieure à 20 cm, il n'est pas apparu de rapport entre le pH et les symptômes de carence, non plus qu'avec le taux de zinc extractible (29 cas examinés).

DISCUSSION

Il ressort de cette étude, en faisant abstraction des états subcarentiels qui n'ont pas été précisés, qu'il est possible de prévoir dans la majorité des cas le degré d'aptitude des sols à pourvoir aux besoins en zinc du maïs dans la région considérée.

Le dosage chimique du zinc dans le sol constitue un élément utile dans cette recherche (tabl. 3), mais il laisse subsister une grande part d'incertitude pour

85 à 90 p. 100 des cas, puisque d'une part 100 dosages de zinc extractible sur 118, d'autre part 70 dosages du zinc « total » sur 78, sont situés en dessous du seuil et correspondent à des sols qui portent indifféremment des plantes carencées ou non carencées (diagramme 1).

La connaissance du pH est, par contre, déterminante pour donner à un diagnostic sa pleine valeur (tabl. 2), qui est obtenue lorsqu'on associe pH du sol et dosage du zinc (tabl. 4). Le pH-eau donne alors des résultats un peu meilleurs que pH KCl, pour les limites de pH fixées, et un test sur dix seulement reste dans le doute.

Une autre conséquence de cette étude est la mise en évidence du pH comme facteur directement lié à la manifestation de la carence en zinc. Si on analyse le problème quant à l'action des chaulages et des marnages, on peut émettre certaines hypothèses à la lumière des nombreux travaux réalisés sur ce sujet :

— L'action propre du pH sur l'approvisionnement en zinc assimilable a été souvent étudiée. Déjà en 1938, LOTT remarquait que l'absorption du zinc par l'avoine passait par un minimum à pH 6,5 et ne variait guère pour des pH plus élevés. Par la suite, de nombreux autres auteurs : STEWART et *al.* (1956), BOAWN et *al.* (1960) ont signalé aussi une meilleure utilisation du zinc lorsque la réaction était acide. WEAR (1956), travaillant sur le sorgho en sol sableux et observant que l'absorption du zinc diminuait lorsque le pH variait de 5,7 à 6,6 par addition de carbonate de chaux, considérait que la réduction de la disponibilité du zinc pour la plante est conditionnée par le pH et non par le calcium, car l'addition au sol de carbonate de sodium, en faisant croître le pH, diminuait également l'absorption du zinc, alors qu'une application de sulfate de calcium, en diminuant le pH de 5,6 à 4,8, entraînait une augmentation de la teneur en zinc de la plante.

Ces données rejoignaient les études de JURINAK et *al.* (1955) sur la possibilité de formation de zincates dans les sols et particulièrement dans un système sol-bentonite : alors qu'en présence de soude ou de potasse le minimum de solubilité du zinc était obtenu vers des pH de 5,5-6,7 (formation de zincates alcalins solubles), le minimum s'observait pour des pH plus élevés, égaux ou supérieurs à 7,6, en présence de chaux (formation de zincates de calcium insolubles).

De leur côté, BERNHEIM et *al.* (1950), travaillant sur des solutions alcalines avaient montré que deux types de zincates étaient susceptibles de se former, en fonction des concentrations de ces solutions en hydroxydes.

Dans l'étude présente, l'augmentation du pH paraît ainsi devoir être une des causes directes du manque d'absorption du zinc par le maïs et elle s'expliquerait par l'effet alcalinisant des chaulages et des marnages.

— L'adsorption du zinc par l'argile des marnes n'a pas été précisée mais elle pourrait ajouter son action aux effets du pH, en réduisant encore la disponibilité du zinc.

Selon DEMUMBRUM et JACKSON (1956), certaines formes de liaisons chimiques pourraient se constituer, par exemple au niveau des montmorillonites-Ca, retenant le zinc plus énergiquement que celui fixé par simple échange ionique. Les éléments manquent à cette étude pour être en mesure d'apprécier l'importance du rôle de ces argiles.

— Une plus grande probabilité d'apparition de symptômes de carence peut

également être envisagée sous l'effet des chaulages, en raison d'une augmentation des rendements des cultures ou d'une modification dans le métabolisme des plantes, avec augmentation parallèle des besoins en zinc ; dans cette hypothèse, outre la part d'insolubilisation du zinc attribuée à l'élévation du pH du fait de ces amendements, il faut aussi considérer qu'on est en présence de sols pauvres en zinc : en effet, par rapport aux 40 à 50 mg de zinc par kg qui sont les moyennes des réserves totales trouvées normalement dans les sols de culture, on voit que le zinc dans les sols étudiés reste à un niveau particulièrement faible, puisque les moyennes trouvées dans les sols à pH-eau supérieur à 6,3 sont de 28 mg par kg et que dans les sols à pH inférieur à 6,3 elles atteignent seulement 23 mg/kg.

10 à 15 p. 100 seulement des sols étudiés paraissent avoir des taux suffisamment élevés (supérieurs à 40 p.p.m. pour les réserves totales ; 3,3 p.p.m. pour le zinc extractible par HCl 0,2 M). Bien que le mode d'échantillonnage ne donne pas une valeur statistique exacte de la fréquence de la carence et de la répartition des pH sur l'ensemble de la région considérée, il est très probable toutefois que les pourcentages précédents soient l'expression générale de la pauvreté en zinc des sols de ce secteur du Bassin de l'Adour.

Il va sans dire que, dans ces conditions, les exigences actuelles de cultures telles que le maïs risquent d'être difficilement satisfaites et il est probable qu'un certain nombre de ces cultures apparemment normales n'ont pas une croissance convenable en raison de l'insuffisance de zinc.

Ces études ont pu montrer que, pour la grande majorité des sols de la région, un marnage ou un chaulage, par suite d'un relèvement important du pH, conduit à l'extériorisation de symptômes de carence sur les plantes. Ces observations n'en retirent pas pour autant aux amendements calcaires leur intérêt pour la mise en valeur des terres acides ou très acides. Dans la pratique agricole, l'éventualité d'apports conjugués de sels de zinc et d'amendements calcaires doit être envisagée.

CONCLUSION

Cette étude limitée à un secteur du Bassin de l'Adour dans le Sud-Ouest atlantique et envisageant uniquement la probabilité d'apparition ou de non-apparition de symptômes de carence en zinc sur culture de maïs, a permis les conclusions suivantes :

1. La connaissance simultanée du pH-eau et des quantités de zinc extraites en solution d'acide fort ou d'acide dilué (HCl 0,2 M), dans la partie comprise entre 0 et 20 cm, constitue un *test valable* pour près de 9 cas sur 10 dans l'appréciation de l'aptitude de ce sol à fournir le zinc sur maïs.

Dans ces conditions, les risques de déficience pour de telles cultures sont hautement probables lorsque le pH est supérieur à 6,4 et les taux de zinc inférieurs à 40 p.p.m. (réserves totales) ou à 3,3 p.p.m. (zinc extractible).

2. L'examen d'un nombre élevé d'échantillons de sols a mis en évidence la pauvreté quasi générale en zinc d'une importante région, dont la vocation est la culture de maïs.

3. Cette pauvreté, alliée à une grande sensibilité de cette plante à la déficience en zinc, a contribué pour une large part à la manifestation de symptômes de carence sous l'effet de l'alcalinisation de ces terres par des amendements calciques.

4. La fertilisation à base de sels de zinc devient une nécessité pour beaucoup de terres à maïs anciennement ou nouvellement mises en culture. La détermination par l'analyse du sol des réserves en zinc pourra servir d'indication pour fixer l'opportunité et l'importance de telles fumures.

Reçu pour publication en février 1967.

SUMMARY

RELATIONSHIP BETWEEN SOIL pH AND EVIDENCE OF ZINC DEFICIENCY IN MAIZE GROWN IN THE CATCHMENT AREA OF THE RIVER ADOUR

In a large area of the Adour Basin, the appearance of a symptomatic zinc deficiency is substantially corroborated by a rising pH-value of the plough lands to a depth from 0 to 20 centimeters. Information on the pH-value may be sufficient as a test for forecasting the appearance of such symptoms. This test showed to be valid in 85.3 per cent of the cases investigated, pH being determined in water. It was found, (in 118 different soils) that 91 per cent of the plants grow normally when the pH-value is less than 6.35 and that 79 per cent show signs of deficiency when this value is more than 6.4. If measured in a KCl solution, the results are slightly inferior.

Determination of the zinc soluble in strong acids or diluted hydrochloric acid (0.2 M HCl), in conjunction with the measurement of pH-value gives diagnostic probabilities rising to 88.5 per cent. It was thus possible to determine a zinc-threshold content of soils (3.3 mg of zinc per kg of soil extracted by 0.2 M HCl, 40 mg of zinc extracted by strong acids).

This study also high-lighted the virtual lack of zinc in soils of this area, the upshot being a worsening of the growth of maize owing to the increased pH-value caused by liming amendments. A zinc-based fertilization is recommended as it is needed in many instances as much in slightly acid or alkaline soils as in high-acid soils requiring extensive liming.

ZUSAMMENFASSUNG

BEZIEHUNG ZWISCHEN DEM PH DES BODENS UND DEM MANGEL AN ZINK BEIM MAIS IN EINEM BEZIRK DES ADOUR-FLUSSES MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN EINER DURCH DIE ANALYSE DES BODENS AUFGESTELLTEN DIAGNOSTIK

Das Auftreten der Zinkmangessymptome beim Mais in einem breiten Bezirk des Adourbeckens ist zum grossen Teil durch das Steigen des pH in den zwischen 0 und 20 cm tiefen Schichten des anbaufähigen Bodens bedingt. Die Kenntnis allein des pH kann als *ein Test* gelten zur Voraussage der Erscheinung dieser Symptome. Wird der pH im Wasser gemessen, so zeigt sich diese Probe als gültig in 85,3 pro 100 der untersuchten Fälle. Es wurde (für 118 Böden) festgestellt, dass wenn der pH niedriger ist als 6,35, 91 pro 100 der Pflanzen eine normale Entwicklung aufweisen, und dass, für den pH über 6,4, bei 79 pro 100 der Pflanzen Mangelsymptome auftreten. Wird der pH in einer KCl N Lösung gemessen, so erzielt man etwas wenig günstigere Ergebnisse.

Die mit der Messung des pH vereinigte *Dosierung des lösbaren Zinkes* in starken Säuren oder in verdünnter Salzsäure (HCl 0,2 M) liefert eine Diagnostik, deren Wahrscheinlichkeit bis zu 88,5 pro 100 der Fällen ansteigt. Auf diese Art, wurde eine Schwelle des Zinkgehaltes in den Böden bestimmt (3,3 mg mit HCl 0,2 M extrahierten Zinks pro kg Erde ; 40 mg mit starken Säuren extrahierten Zinks pro kg Erde).

Diese Untersuchung erklärt auch die fast allgemeine *Armut an Zink* der Böden dieser Gegend deren Einfluss auf das Maiswachstum durch die auf den Kalkdünger zurückzuführende Zunahme des pH noch verschlimmert wird. Eine Zink enthaltende Düngung wird empfohlen. Diese ist in zahlreichen Fällen notwendig, sowohl in den schwach sauren oder alkalischen Böden als in Böden mit sehr starkem Säuregehalt, die eine bedeutsame Kalkung erfordern.

Соотношение между pH почвы и проявлением цинковой недостаточности у кукурузы в одном из секторов реки Адур.

— Возможности и пределы диагноза при помощи анализа почвы.

А. ДАРТИГ и Е. ЛЮБЭ.

РЕЗЮМЭ

Появление симптомов цинковой недостаточности у кукурузы в обширном секторе Нижнего Адура, в значительной мере, обусловлено повышением pH пахотного слоя имеющего от 0 до 20 см. глубины. Определение pH может таким образом, само по себе, служить предпосылкой появления этих симптомов; эта предпосылка оказалась верной в 85,3 % исследованых случаях при измерении pH воды : было отмечено (на 118 образцов почв), что 91 % растений развиваются нормально при pH = 6,35 и что 79 % представляют симптомы цинковой недостаточности при pH превышающем 6,4. Измерение pH в растворе KCl 1н дало результаты немного менее удовлетворительные.

Дозаж растворимого цинка при помощи сильных кислот или разбавленной соляной кислоты (HCl 0,2 M) в комбинации с измерением pH позволяет диагноз правильность предпосылки которого увеличивается до 88,5 — случаев. Благодаря этому удалось установить порог содержания цинка в почве (3,3 мг. цинка на кг. почвы при извлечениях с помощью HC- 0,2 M; 40 мг. цинка на кг. почвы при извлечениях с помощью сильных кислот).

Данное изучение указывает также на общий недостаток цинка в почвах этого района и отрицательное действие этой недостаточности на кукурузу еще усиляется при повышении pH наблюдающимся после известкований. Поэтому авторы рекомендуют, в большинстве случаев, цинковые подкормки необходимые как в слабо-кислых почвах или солонцах, так и в почвах с сильной кислотностью, требующих крупных прибавок извести.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BERNHEIM P., QUINTIN M., 1950. Étude de l'équilibre dans les solutions de zincate alcalin. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **230**, 388-390.

BOAWN L. C., VIETS F. G. jr., CRAWFORD C. L., NELSON J. L., 1960. Effect of nitrogen carrier, nitrogen rate, zinc rate, and soil pH on zinc uptake by sorghum, potatoes and sugar beets. *Soil Sci.*, **90**, 329-337.

CAMP A. F., REUTHER W., 1937. *Flo. agric. Exper. Stn. Annu. Rep.*, 132-135

CHANDLER W. H., 1937. Zinc as a nutrient for plants. *Bot. Gaz.*, **98**, 625-646.

DARTIGUES A., DELMAS J., LUBET E., ROUTCHENKO W., 1963. Premiers résultats sur l'étude de la carence en zinc dans le Sud-Ouest. *C. R. Acad. Agric.* 20-2-63, 266-279.

DARTIGUES A., 1966. Application d'une technique simple pour le dosage chimique du zinc dans les sols et les végétaux. *Ann. agron.*, **17** (1), 75-89.

DEMUMBRUM L., JACKSON M. L., 1956. Infrared absorption evidence on exchange reaction mechanism of copper and zinc with layer silicate clays and peat. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 334-337.

GREENWOOD M., HAYFRON R. J., 1951. Iron and zinc deficiencies in cacao, in the gold coast. *Emp. J. exper. Agric.*, **19**, 73-86.

JURINAK J. J., THORNE D. W., 1955. Zinc solubility under alkaline conditions in a zinc-bentonite system. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **19**, 446-448.

LEEPER G. W., 1952. Factors affecting availability of inorganic nutrients in soils with special reference to micronutrient metals. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **23**, 1-16.

LOTT W. L., 1938. The relation of hydrogen-ion concentration to the availability of zinc in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **3**, 115-121.

ROUTCHENKO W., 1961. Détermination d'une carence en zinc sur maïs. *C. R. Acad. Agric.* 11-10-61, 739-741.

SHAW E., DEAN L. A., 1952. Use of dithizone as an extractant to estimate the zinc nutrient status of soils. *Soil Sci.*, **73**, 341-347.

STEWART I., LEONARD C. D., 1956. *U. S. At. Energy. Comm. TID.* **7512**, 245-251.

THORNE D. W., WANN F. B., 1950. Nutrient deficiencies in Utah orchards. *Utah agric. Exper. Stn. Bull.* **338**, 1-29.

WEAR J. I., 1956. Effect of soil pH and calcium on uptake of zinc by plants. *Soil Sci.* **81**, 311-315.

WINTERS E., PARKS W. L., 1955. Zinc deficiency of corn. *Tennessee Farm and Home Sci. Profr. Rept.* 1 (i. e. 14) 6-8, Apr. Jun.

WOLTZ S., TOTH S. J., BEAR F. E., 1953. Zinc status of New Jersey soils. *Soil Sci.*, **76**, 115-122.

Ann. agron., 1967, **18** (3), 301-331.

LUMIÈRE, EAU ET PRODUCTION DE MATIÈRE SÈCHE DU COUVERT VÉGÉTAL

P. CHARTIER

Station centrale de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles

Il est possible de représenter sous une formulation unique les effets combinés de la lumière, de l'alimentation en eau et du gaz carbonique sur la production instantanée de matière sèche du couvert végétal, compte tenu des caractéristiques biologiques et agronomiques. Les résultats expérimentaux qui ont pu être confrontés à cette étude essentiellement théorique la confirment en grande partie.

Un grand nombre d'interventions agronomiques montrent que la production de matière sèche des cultures est sous la dépendance du facteur eau (irrigation, drainage, brise-vent) et du facteur lumière (densité de semis, taille, palissage, amélioration génétique du port des plantes, etc...). Ces deux facteurs ont bien été l'objet de nombreuses études, mais le plus souvent un seul d'entre eux était considéré à la fois. C'est pourquoi nous avons cherché à exprimer la production de matière sèche dans une formulation unique qui tient compte simultanément de la répartition de la lumière dans le couvert végétal (MONSI, SAEKI, 1953), des conditions d'alimentation hydriques (BOUCHET, 1963) et des lois régissant la photosynthèse de la feuille (CHARTIER, 1966 *b* et *c*). Ce travail est le prolongement direct de deux articles parus précédemment dans les *Annales de l'I. N. R. A.* (CHARTIER, *a* et *c*) et qui sont relatifs d'une part au microclimat lumineux dans la végétation et d'autre part à la photosynthèse de l'unité de surface de feuille.

La photosynthèse et la transpiration sont les principaux phénomènes soumis au facteur lumière et au facteur eau. Ils correspondent tous les deux à des échanges de masse et d'énergie entre le système plante et le milieu. En s'appuyant sur des modèles (représentation schématique d'une feuille ou d'un couvert), on peut appliquer des lois physiques ou chimiques pour rendre compte des phénomènes élémentaires et les combiner ensuite pour obtenir une présentation synthétique de la photo-

synthèse et de la transpiration. Parmi ces lois physiques élémentaires ainsi introduites, on peut citer les lois de la diffusion, de l'absorption de l'énergie lumineuse, du bilan énergétique de la feuille et des vitesses de réaction chimique.

Une telle perspective de travail suppose que l'on puisse caractériser chaque partie de la plante ou chaque phénomène physiologique par un paramètre déterminé. Par exemple, la diffusion du gaz carbonique de l'air au chloroplaste dépend entre autres des structures anatomiques du mésophylle ; ces dernières seront caractérisées par la valeur d'une résistance définie pour le phènomène considéré. De même les limitations de la photosynthèse de nature biochimique, rendant compte par exemple d'une nutrition minérale insuffisante seront appréciées par la valeur d'une constante de vitesse de réaction. L'étude sur modèle telle qu'elle vient d'être définie n'est possible que si les paramètres caractéristiques de la plante restent constants. Une telle supposition est admissible dans des limites de temps suffisamment courtes. En effet, le milieu et le potentiel génétique conduisent à une continuelle modification de ces paramètres qu'il est prématuré de vouloir mettre en équation. Néanmoins, les considérations théoriques relatives à la photosynthèse et à la transpiration si elles ne sont applicables en toute rigueur qu'à des laps de temps relativement courts (quelques minutes, quelques heures ou quelques jours suivant le phénomène considéré) sont cependant susceptibles de rendre compte schématiquement de l'action conjuguée des différents facteurs sur la production de matière sèche d'une culture. En dépit de la continuelle variation des paramètres, la production totale correspondant à la saison de végétation est bien la somme des productions élémentaires définies ci-dessus.

Par ailleurs, si la végétation cultivée présente une très grande variabilité de formes, de densités et de ports des feuilles, il est malgré tout possible de définir un certain nombre de types de cultures se rattachant à 2 grandes familles :

— les couverts continus qui comprennent en particulier les couverts homogènes pour lesquels l'éclairement est supposé constant sur des plans horizontaux à tous les niveaux (pas ou peu de taches de soleil) ;

— les couverts discontinus présentant une variation périodique dans l'espace de l'indice foliaire (cultures en ligne, jeunes semis, arbres fruitiers) .

La présente étude est limitée à la production de matière sèche dans le cas le plus simple : celui des couverts homogènes. Ces derniers ne correspondent qu'aux cas particuliers des cultures à voûte foliaire dense, le trèfle par exemple ; toutefois, beaucoup de cultures se comportent comme des couverts homogènes lorsque la lumière est essentiellement diffuse (ciel nuageux). Par contre, les parties traitant de la photosynthèse et de la transpiration de la feuille ont évidemment un caractère plus général.

I. — PHOTOSYNTHÈSE DE L'UNITÉ DE SURFACE DE FEUILLE

L'unité de surface de feuille est considérée comme l'usine élémentaire de production de la matière sèche du couvert végétal. Le choix de l'unité de surface plutôt que de la feuille entière est imposé par la notion de flux d'énergie ou de masse entre la feuille et l'extérieur.

L'étude de l'intensité de la photosynthèse P en fonction de l'énergie lumineuse E a été l'objet de nombreux travaux expérimentaux. Les courbes expérimentales obtenues sont fréquemment assimilées à des hyperboles équilatères (fig. 1) dont l'équation est de la forme :

$$P = \frac{bE}{1 + aE} \qquad (1)$$

b représentant la pente de la tangente à l'origine et $\frac{b}{a}$ la valeur maximale de la photosynthèse, c'est-à-dire l'ordonnée à l'origine de l'asymptote (fig. 1).

C'est une formule de ce type qui a toujours été employée dans les études théoriques de la production du couvert végétal en fonction du facteur lumière (MONSI, SAEKI, 1953, de WIT 1965, BUDYKO 1964, etc.). C'est pourquoi une amélioration

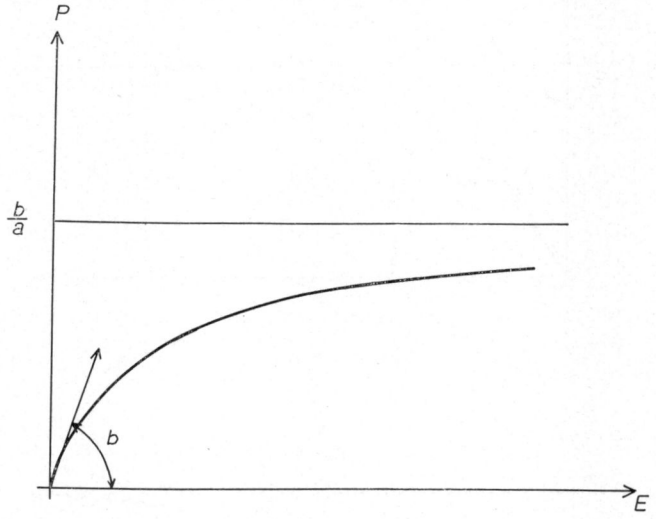


FIG. 1. — *Photosynthèse de l'unité de surface de feuille P en fonction de l'énergie lumineuse E*
Ajustement à une hyperbole équilatère.

possible de ces travaux peut résider dans la recherche de la signification et de l'expression des paramètres $\frac{b}{a}$ et b. On peut y parvenir (MONTEITH, 1963, CHARTIER, 1966 *b* et *c*) dans le cas du régime permanent, en combinant l'expression du flux de diffusion du gaz carbonique depuis l'air jusqu'aux chloroplastes et les relations établies par RABINOVITCH (1951) concernant les premières réactions chimiques. En effet, en régime permanent, le flux de molécules de gaz carbonique de l'air aux chloroplastes est égal à celui qui entre dans les réactions chimiques. Ce flux est une mesure de l'intensité de la photosynthèse P. On aboutit, de cette manière, à l'expression générale suivante :

$$-(R_a + R_s + R_m)\,P^2 + (R_a + R_s + R_m + R_c)\,\alpha EP + CP - C\alpha E = 0 \qquad (2)$$

où

P est la photosynthèse de la feuille (g cm^{-2} s^{-1}),
E l'énergie lumineuse absorbée par la feuille (erg cm^{-2} s^{-1}),
C la concentration en gaz carbonique de l'air (g cm^{-3}),

R_a la résistance à la diffusion du gaz carbonique dans l'air (s cm^{-1}),
R_s la résistance des stomates et de la cuticule (s cm^{-1}),
R_m la résistance dans le mésophylle (s cm^{-1}),
R_c la résistance à la carboxylation (effet de la température, de l'alimentation minérale, de l'état physiologique) (s cm^{-1}),
α le rendement lumineux maximal de la photosynthèse (g erg^{-1}).

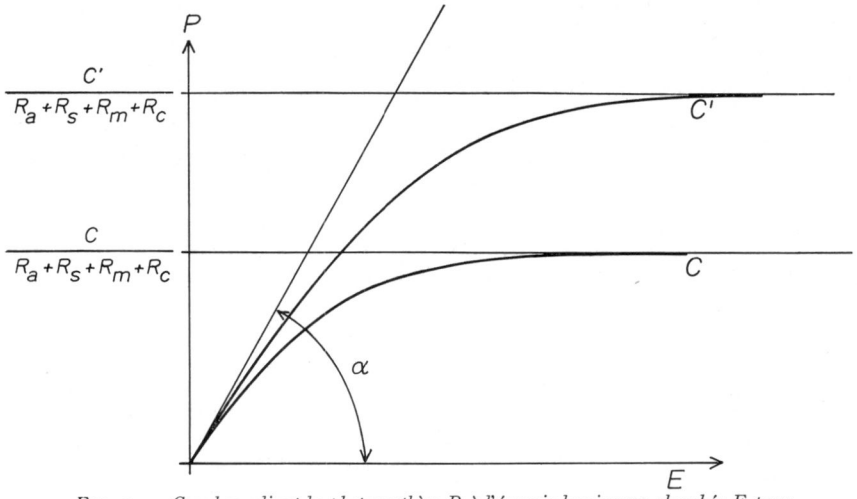


FIG. 2. — *Courbes reliant la photosynthèse P à l'énergie lumineuse absorbée E pour différentes concentrations en gaz carbonique C*

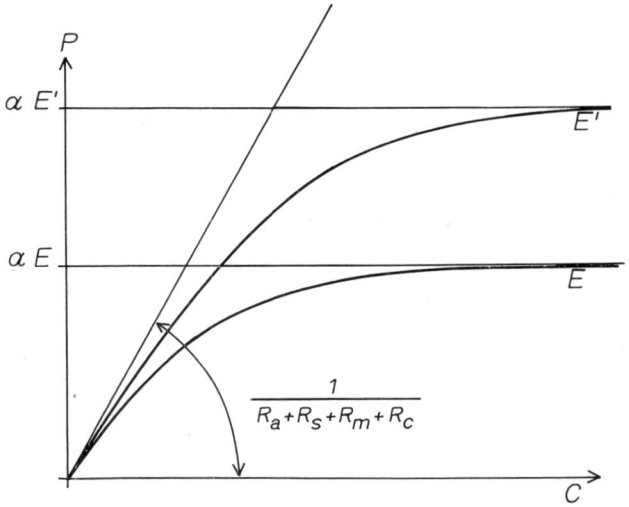


FIG. 3. — *Courbes reliant la photosynthèse P à la concentration en gaz carbonique C pour différentes énergies lumineuses absorbées E*

Graphiquement cette équation se traduit par des familles d'hyperboles que l'on exprime P en fonction de E (fig. 2) ou P en fonction de C (fig. 3). L'emploi de l'expression générale de la photosynthèse de la feuille (relation (2)) pour obtenir la pho-

tosynthèse totale du couvert conduit à des formulations mathématiques trop compliquées. C'est pourquoi, il est commode de simplifier cette expression (CHARTIER, HALLAIRE, 1967) en assimilant la courbe obtenue à une hyperbole équilatère (équation 1) qui aurait même pente à l'origine et même ordonnée de l'asymptote horizontale, ce qui revient à supprimer le terme en P^2 de l'équation générale (2). Cette simplification n'introduit pas de différences notables dans les résultats obtenus dans la suite du texte. On utilisera donc la relation suivante entre l'intensité de la photosynthèse P et l'énergie lumineuse absorbée E :

$$P = \frac{\alpha E \dfrac{C}{(R_a + R_s + R_m + R_c)}}{\alpha E + \dfrac{C}{(R_a + R_s + R_m + R_c)}} \qquad (3)$$

On notera la symétrie entre les deux termes :

$$\alpha E$$

qui représente la valeur maximale de l'assimilation si la concentration en gaz carbonique de l'air devient très élevée (famille des courbes P(C), figure 3) et

$$\frac{C}{R_a + R_s + R_m + R_c}$$

qui représente la valeur maximale de l'assimilation si l'énergie lumineuse n'est plus limitante (famille des courbes P(E), fig. 2).

II. — PRODUCTION DE MATIÈRE SÈCHE DU COUVERT VÉGÉTAL

21. *Considérations théoriques*

Si l'on ajoute les intensités de photosynthèse de chacune des feuilles formant un couvert végétal, on obtient la photosynthèse totale. L'intérêt d'une telle opération est de mettre en évidence de nouveaux facteurs de la production qui n'apparaissaient pas dans les études au niveau de la feuille. C'est le cas de la surface foliaire et du port de la plante. Cette sommation est relativement aisée lorsque la lumière est supposée être le seul facteur variable d'une feuille à l'autre et dans le cas simple du couvert homogène (éclairement supposé uniforme à un niveau donné, taches de soleil négligeables).

Dans un article précédent (CHARTIER, 1966 *a*) nous avions précisé les lois de la pénétration de la lumière dans la végétation en reprenant les travaux de MONSI et SAEKI (1953) à propos du couvert homogène. Rappelons que l'on peut alors appliquer la loi de Beer à l'absorption de la lumière :

$$\Phi(f) = E_0 \, e^{-\kappa f} \qquad (4)$$

$\Phi(f)$ étant l'énergie incidente par unité de surface horizontale (éclairement) au niveau f,

f indice foliaire partiel : surface des feuilles comprises entre le niveau considéré et le sommet de la végétation par unité de surface de sol (nombre sans dimension),

E_0 éclairement d'un plan horizontal au sommet de la végétation diminué de l'albédo (pertes par réflexion vers le ciel),

K coefficient d'extinction de la lumière.

Rappelons également que le coefficient d'extinction K peut s'exprimer dans un certain nombre de cas simples de la manière suivante (CHARTIER, 1966 *a*) :

$$K = (1 - T) \cos i$$

T étant le facteur de transmission des feuilles pour la lumière considérée,

i l'inclinaison moyenne des feuilles sur le plan horizontal.

Le rôle des propriétés optiques (T) et du port des feuilles (i) dans la pénétration de la lumière apparaît ainsi explicitement.

Par ailleurs, dans les formules 2 et 3, l'intensité de la photosynthèse de l'unité de surface de feuille est exprimée en fonction de l'énergie lumineuse absorbée par unité de surface foliaire E et non pas en fonction de l'énergie incidente. Or entre les niveaux f et $f + df$, la surface foliaire df absorbe une énergie lumineuse qui s'obtient en différenciant l'expression (4)

$$- d\Phi (f) = KE_0 \, e^{- Kf} \, df$$

L'énergie E considérée ci-dessus, énergie absorbée par unité de surface foliaire au niveau f est donc :

$$E = - \frac{d \, \Phi(f)}{df} = + KE_0 \, e^{-Kf} \tag{5}$$

En reportant la valeur de E de la relation 5 dans la relation 3, la photosynthèse de l'unité de surface de feuille P devient une fonction de la variable f. La photosynthèse élémentaire relative à une surface df s'écrit simplement (P df). Dès lors pour la photosynthèse du couvert végétal tout entier P′, rapportée à l'unité de surface de sol, il vient :

$$P' = \int_0^F P \, df$$

L'intégration est simple si seule la variable E est une fonction de f, on verra ultérieurement les limites d'une telle hypothèse ; elle conduit à :

$$P' = p + \overline{r}F = \frac{C}{K (R_a + R_s + R_m + R_c)} \operatorname{Log} \left[\frac{1 + \frac{K}{C} (R_a + R_s + R_m + R_c) \propto E_0}{1 + \frac{K}{C} (R_a + R_s + R_m + R_c) \propto E_0 \, e^{-KF}} \right] \tag{6}$$

où

p représente la production de matière sèche du couvert végétal par unité de surface de sol,

$\bar{r}F$ la respiration totale par unité de surface de sol ; cette respiration est supposée proportionnelle à la surface foliaire totale F, considérée elle-même comme proportionnelle à la masse végétale,

F l'indice foliaire (LAI), surface totale des feuilles par unité de surface de sol,

E_o l'éclairement dans le visible d'un plan horizontal au-dessus du couvert végétal, diminué des pertes par réflexion vers le ciel,

C la concentration en gaz carbonique de l'air,

R_a la résistance à la diffusion du gaz carbonique dans l'air,

R_s la résistance stomatique et cuticulaire,

R_m la résistance du mésophylle,

R_c la résistance à la carboxylation,

α le rendement lumineux maximal de la photosynthèse.

En fait, l'intégration qui conduit à la relation (6) est beaucoup plus complexe car plusieurs termes dépendent du niveau auquel on se place dans le couvert, donc de f :

$K(f)$ le port peut varier avec la hauteur,

$C(f)$ la concentration en gaz carbonique de l'air est variable dans le profil,

$R_a(f)$ la microturbulence à l'intérieur du couvert conduit à une variation de la résistance à la diffusion dans l'air,

$R_s(f)$ la régulation stomatique peut être différente dans le profil, au moins pour trois raisons dues à l'environnement :

1. profil lumineux,
2. gradient de concentration en gaz carbonique,
3. gradient de rayonnement net et de déficit de saturation (déterminant un éventuel déséquilibre hydrique),

$R_c(f)$ l'état physiologique est variable, en particulier avec l'âge des feuilles.

Les hypothèses de base et les principaux résultats ont déjà été établis par MONSI et SAEKI (1953) et repris en particulier par VERHAGEN, WILSON et BRITTEN (1963). Toutefois, ces auteurs n'avaient introduit dans l'expression de la production que les coefficients non explicités a et b de la formule (1). Il faut souligner l'intérêt de l'introduction de la concentration en gaz carbonique et surtout des résistances à la diffusion. En particulier, c'est l'introduction de la régulation stomatique (R_s) qui permettra de traiter théoriquement le problème de l'influence de l'alimentation en eau sur la production instantanée du couvert végétal.

Revenons à l'expression de la production du couvert p (relation (6)) qui permet d'étudier théoriquement les effets sur p de la variation des grandeurs suivantes :

indice foliaire F et coefficient d'extinction K ;
énergie lumineuse E_0 ;
concentration en gaz carbonique C ;
résistance R_a, R_s, R_m ou R_c.

a) *Effet de l'indice foliaire F et du coefficient K sur la production.*

La représentation graphique de la production p en fonction de l'indice foliaire F constitue la figure 4. L'expression de la production telle qu'elle apparaît dans la

relation 6 comprend 2 termes ; l'un dépend de la photosynthèse, l'autre de la respiration. Ces deux termes sont représentés séparément sur la figure 4. La respiration globale dépendant de la masse totale du végétal est supposée proportionnelle à l'indice foliaire F.

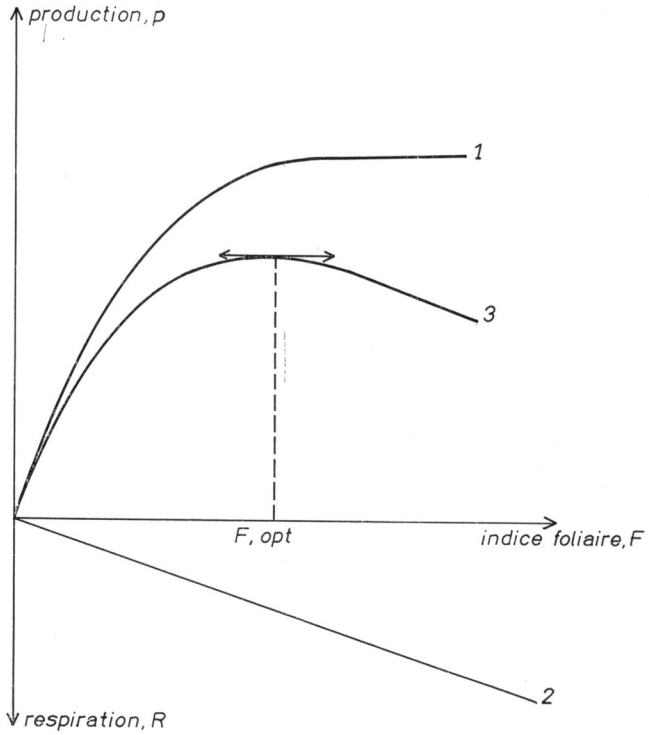


FIG. 4. — *Effet de l'indice foliaire F sur la production de matière sèche du couvert végétal p*
p (courbe 3) est la différence entre la photosynthèse P′ (courbe 1) et la respiration $\bar{r}$F (courbe 2) du couvert végétal.

Il faut souligner l'existence d'un indice foliaire optimal F_{opt}. Cet indice foliaire optimal correspond au fait que les feuilles inférieures du couvert sont au point de compensation ; ce résultat obtenu souvent d'une manière intuitive peut se vérifier ainsi :

1. La valeur de F_{opt}. peut tout d'abord s'obtenir en dérivant l'expression de p tiré de l'équation 6 par rapport à F et en déterminant la valeur de F qui annule la dérivée, on obtient :

$$F_{opt} = \frac{1}{K} \operatorname{Log} \left[\alpha \frac{E_0 K}{\bar{r}} \left(1 - \frac{(R_a + R_s + R_m + R_c)\bar{r}}{C} \right) \right] \qquad (7)$$

De cette formule, on déduit en particulier que l'indice foliaire optimal est une fonction toujours croissante de l'énergie lumineuse incidente E_0.

2. F_{opt} peut être déterminé d'une manière plus directe en écrivant que les feuilles inférieures du couvert sont au point de compensation : il suffit d'écrire qu'au

niveau du sol (où $f = F$) la photosynthèse de la feuille est égale à la respiration par unité de surface $\bar{r}$. La relation 3 s'écrit alors :

$$P = \frac{\alpha\, C\, E_0\, K\, e^{-KF}}{C + \alpha\,(R_a + R_s + R_m + R_c)\, E_0\, K e^{-KF}} = \bar{r}$$

On obtient ainsi une expression de F qui est la même que celle de la relation (7).

Cette relation (7) sera utilisée en particulier lors des vérifications expérimentales. D'un point de vue strictement biologique, notons que la réalisation de l'indice foliaire optimal peut être en rapport avec certains aspects du développement des végétaux cultivés.

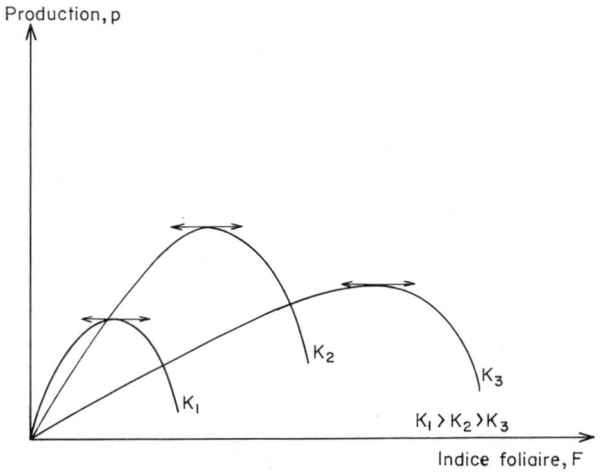


FIG. 5. —*Effet de l'indice foliaire F et du coefficient d'extinction de la lumière K sur la production de matière sèche du couvert végétal* p

Par ailleurs, la production, pour un indice foliaire donné, dépend du coefficient d'extinction de la lumière K. La figure 5 représente trois courbes production-indice foliaire pour des valeurs de K différentes (de K_1 à K_3, les feuilles sont de plus en plus dressées). L'expression de K que nous avons déterminée au cours de l'étude du microclimat lumineux dans la végétation [$K = (1 - T) \cos i$] montre que c'est essentiellement l'angle moyen des feuilles avec le plan horizontal i, qui est responsable de la différence entre les courbes production-indice foliaire. On notera qu'il existe un couple particulier de valeurs de l'indice foliaire optimal et du coefficient d'extinction (K_2 de la fig. 5) qui conduit à la plus grande production possible pour le type de couvert étudié. Ce couple de valeur se déplace vers les valeurs élevées de l'indice foliaire et les valeurs faibles du coefficient d'extinction si l'éclairement augmente tandis que la production correspondante croît.

On voit également (relation 7) que cet indice foliaire optimal est une fonction des paramètres caractéristiques de l'intensité de la photosynthèse de la feuille (C, $R_a + R_s + R_m + R_c$, α) et de celle de la respiration r.

L'étude purement mathématique de ces variations (dérivation de la production correspondant à l'indice foliaire optimal par rapport au coefficient d'extinction) conduit à une équation dont il paraît difficile de trouver une expression analytique de la racine ; c'est pourquoi cette partie ne sera pas développée au cours de cet article.

Il convient de souligner le rôle du port des plantes et de sa variation au cours du temps dans la photosynthèse du couvert végétal.

b) *Effet de l'énergie lumineuse incidente E_0 sur la production.*

La figure 6 représente la production p en fonction de l'énergie lumineuse incidente E_0 (dans le visible, diminuée des pertes par réflexion vers le ciel). Afin de situer la gamme usuelle de conditions lumineuses sur ce schéma, on s'est placé dans le cas particulier de la figure 7. Il montre notamment que les intensités lumineuses natu-

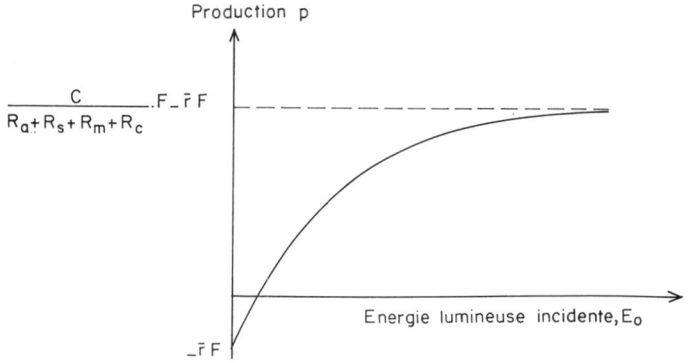


FIG. 6. — *Effet de l'énergie incidente E_0 sur la production de matière sèche du couvert végétal p*

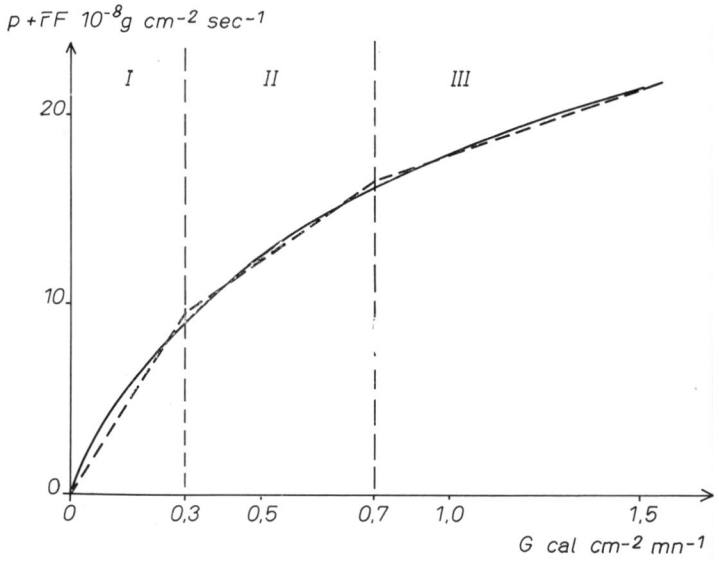


FIG. 7. — *Photosynthèse du couvert végétal et rayonnement global* G
Cas d'un couvert végétal caractérisé par :

$$F = 4$$
$$K = 0{,}78$$
$$R_a + R_s + R_m + R_c = 4 \text{ sec cm}^{-1}$$

Dans chacune des trois gammes de G considérées, la courbe est assimilable à une droite.

(10^{-8} g cm^{-2} s^{-1} = 3,6 mg dm^{-2} heure $^{-1}$)

relles sont loin d'être saturantes pour les couverts végétaux, sauf dans le cas où un excès d'énergie entraîne une régulation stomatique (voir plus loin). La représentation graphique de la production en fonction de l'énergie lumineuse permettra également de préciser l'échelle de temps à laquelle l'étude doit être faite. En effet, la relation 6 n'est théoriquement valable qu'à un instant donné. Si l'on veut étendre la relation à un laps de temps de plusieurs heures, ou d'une journée, on serait tenté de remplacer E_0 par sa valeur moyenne. Or la courbe production-éclairement étant

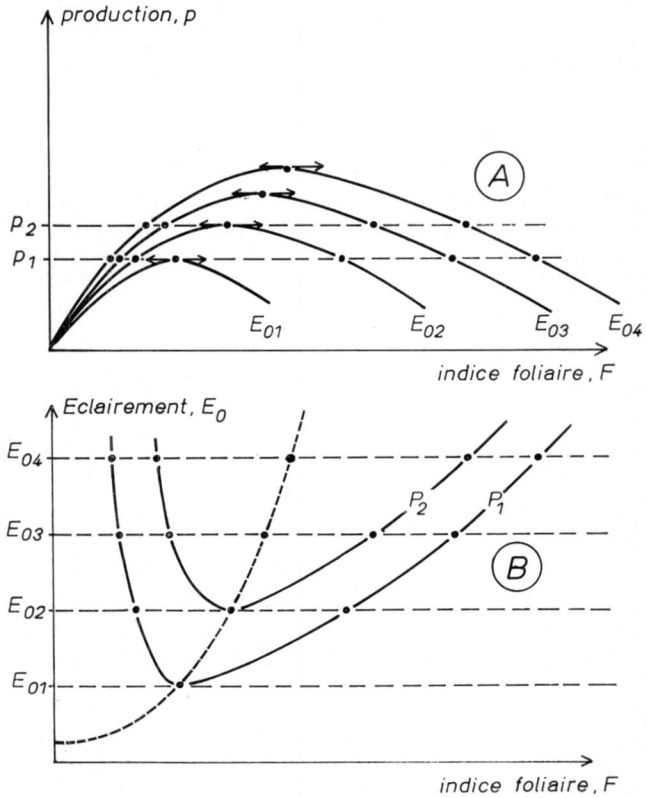


FIG. 8. — A. *Effet de l'indice foliaire F et de l'éclairement E_0 sur la production de matière sèche du couvert végétal p*
B. *Courbes d'isoproduction dans un système de coordonnées indice foliaire-éclairement*

moins que proportionnelle, le poids de chaque valeur élémentaire de E n'a pas une valeur proportionnelle à E ; il est plus lourd pour les valeurs faibles (bon rendement) que pour les valeurs élevées de l'éclairement. Pour limiter cette erreur, il suffit de décomposer la journée en périodes où l'éclairement est tel que la courbe photosynthèse-éclairement puisse être assimilée à une droite. Dans le cas d'une courbe présentant une concavité analogue à celle de la figure 7, trois classes seraient suffisantes. Il est alors possible de prendre la valeur moyenne de l'éclairement à l'intérieur de chaque classe. Par ailleurs cette remarque à propos de l'échelle de temps nous a conduit à ne retenir que les vérifications expérimentales, qui se font toujours pendant

une période de quelques jours, dans les cas où l'on reste dans la gamme inférieure d'éclairement (voir plus loin les travaux de STERN et DONALD, 1962, sur le trèfle).

Une autre présentation des variations de la production en fonction à la fois de l'indice foliaire F et de l'éclairement E_0 est possible (fig. 8). Les courbes du graphique A sont du même type que celles de la figure 4 (E_0 étant pris comme paramètre). Les courbes du graphique B qui s'en déduisent sont des courbes d'isoproduction. En effet, elles caractérisent les couples de valeurs (E_0, F) conduisant à une même valeur de la production. L'intérêt de cette présentation est de faire apparaître la variation de l'indice foliaire optimal en fonction de l'éclairement (courbe en tirets). De plus, c'est une présentation de ce type qu'ont employée STERN et DONALD, 1962, dans leur travail expérimental sur le trèfle (voir § 221).

c) *Effet de la concentration en gaz carbonique sur la production.*

La figure 9 représente la variation, déduite de la formule théorique (relation 6), de la production en fonction de la concentration en gaz carbonique pour deux niveaux d'éclairement différents. Les paramètres caractérisant le couvert végétal et la photosynthèse de la feuille sont les mêmes que ceux utilisés dans le cas de la figure 7.

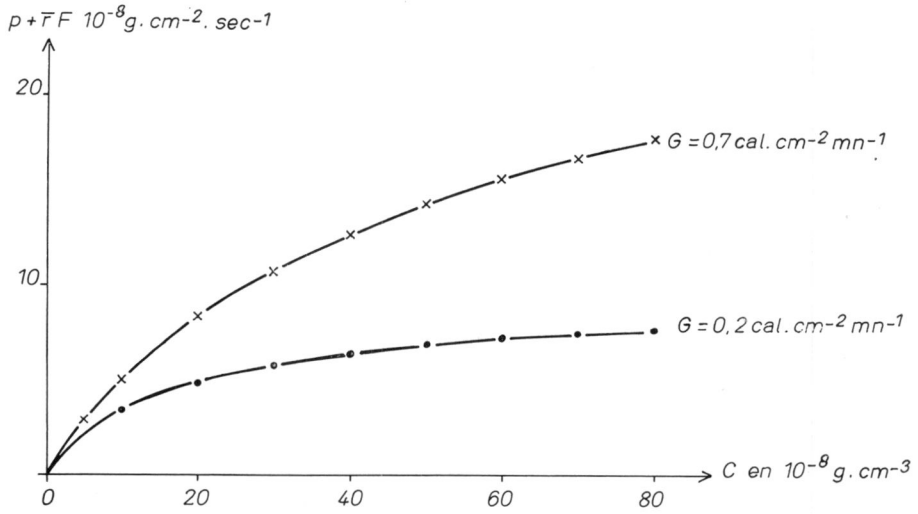


FIG. 9. — *Effet de la concentration en gaz carbonique sur la photosynthèse pour deux niveaux d'éclairements*
Cas d'un couvert identique à celui caractérisé dans la légende de la figure 7.
(0,031 % = $60 \cdot 10^{-8}$ g cm^{-3} de CO_2)

Il faut signaler que l'effet dépressif bien connu d'une concentration élevée en gaz carbonique n'apparaît pas sur la courbe. Il est dû en particulier à une augmentation de la résistance stomatique R_s, que l'on a supposée constante dans le tracé des courbes.

d) *Effet de la modification d'une résistance sur la production.*

La figure 10 représente la variation de la production en fonction de la valeur de la somme des résistances.

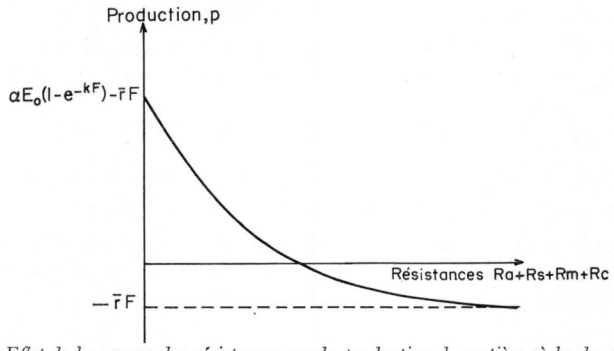


FIG. 10. — *Effet de la somme des résistances sur la production de matière sèche du couvert végétal*

22. *Confirmations expérimentales*

Il nous est apparu indispensable de vérifier les aspects théoriques qui viennent d'être indiqués et de rechercher pour ce faire certaines études expérimentales réalisées par ailleurs et suffisamment complètes pour être interprétées.

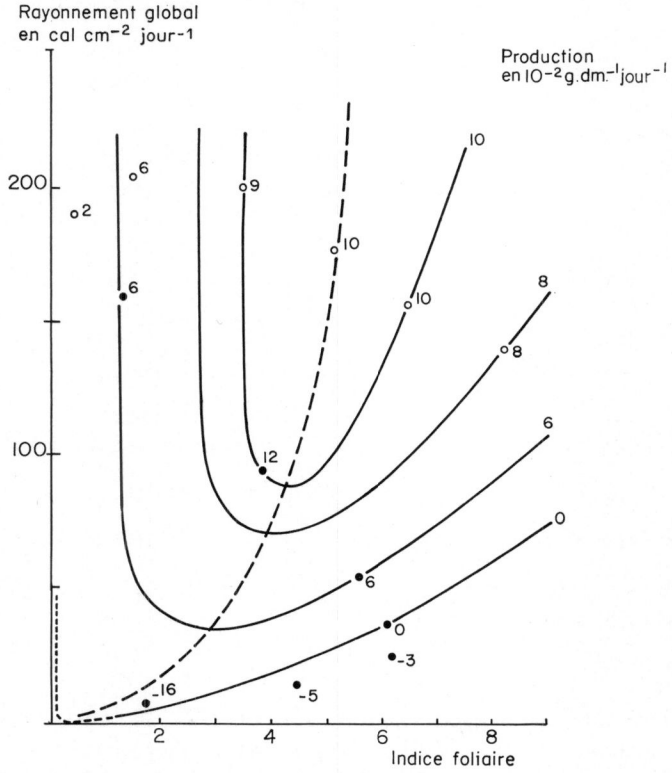


FIG. 11. — *Courbes expérimentales d'isoproduction dans un système de coordonnées indice foliaire-rayonnement global*
(cas du trèfle)
(d'après STERN et DONALD, 1962 b)

L'étude expérimentale sur le trèfle faite par STERN et DONALD (1962 *a* et *b*) fournira un exemple de couvert homogène, puis on reprendra le résultat classique de WATSON et WITTS (1954) sur l'amélioration génétique de la betterave.

221. *Travaux de* STERN *et* DONALD *sur le trèfle*

STERN et DONALD (1962 *a* et *b*) représentent la production journalière de trèfle p, en fonction de l'indice foliaire F et du rayonnement global reçu pendant toute la journée, E_0 (fig. 11). Cette courbe expérimentale est du type même que la courbe inférieure de la figure 8. Faisons l'hypothèse qu'une culture de trèfle est un couvert homogèn eet vérifions la par ses conséquences.

a*) Forme de la courbe production-indice foliaire.*

Si l'on retient sur la figure 11 un certain nombre de points expérimentaux correspondant par exemple à la gamme d'éclairement :

$$150 < E_0 < 200 \text{ cal cm}^{-2} \text{ jour}^{-1}$$

il est possible de passer à une représentation graphique de p en fonction de F (fig. 12). Le passage de la figure 11 à la figure 12 se fait par l'opération inverse de celle effectuée pour obtenir les courbes du graphique B à partir des courbes du graphique A de la figure 8. La courbe expérimentale présente bien un maximum (à l'image des figures 4. 5. 8).

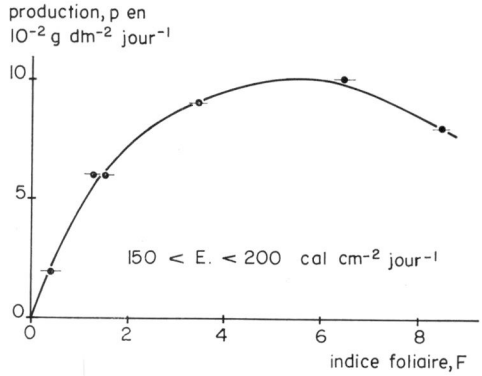


FIG. 12. — *Production de matière sèche du couvert végétal en fonction de l'indice foliaire*
(cas du trèfle)
(à partir de la figure 11 due à STERN et DONALD)

b*) Forme exponentielle du profil lumineux et détemination de K.*

Un couvert végétal homogène a un profil lumineux caractérisé par la relation 4 que l'on peut mettre sous forme logarithmique :

$$\text{Log} \frac{E_0}{E} = Kf$$

STERN DONALD (1962 *a*) ont déterminé un profil lumineux dans une culture de trèfle. Nous avons utilisé ce résultat expérimental qui est porté en coordonnées semi-logarithmiques sur la figure 13. L'ajustement à une droite par la méthode des moindres carrés est satisfaisant, compte tenu de la difficulté de ce type de mesure. La pente de la droite permet de calculer le coefficient d'extinction K, soit 0,75.

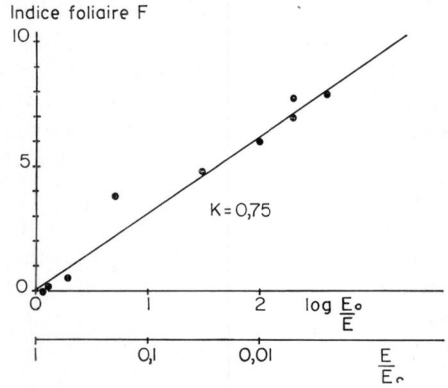


FIG. 13. — *Profil lumineux dans une culture de trèfle, en coordonnées semi-logarithmiques* (à partir des mesures faites par STERN et DONALD)

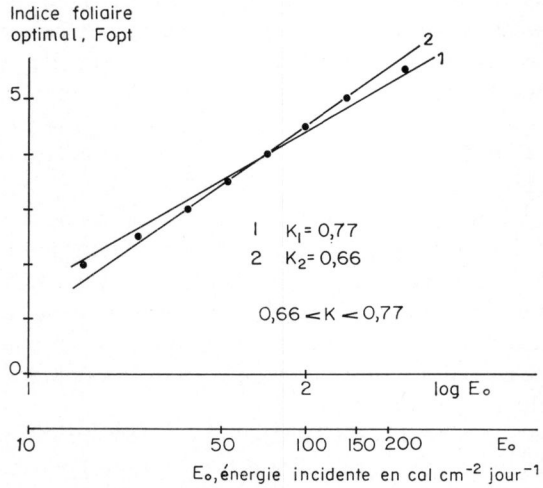


FIG. 14. — *Effet de l'énergie lumineuse incidente E_0 sur l'indice foliaire optimal F_{opt}, en coordonnées semi-logarithmiques*
Les points sont obtenus à partir de la courbe en pointillé de la figure 11.

c) *Forme exponentielle de la relation entre l'indice foliaire optimal et le rayonnement global et détermination de K.*

STERN et DONALD (1962 *b*) ont tracé la courbe représentée en tirets de la figure 11 qui correspond à la relation (F_{opt}, E_0) conduisant à la production maximale. Par ailleurs, l'étude théorique avait permis d'établir la relation 7 qui peut se mettre sous la forme suivante :

$$F_{opt} = \frac{1}{K} \text{Log } E_0 + A$$

avec

$$A = \frac{1}{K} \text{Log} \left[\frac{\alpha K}{\bar{r}} \left(1 - \frac{R_a + R_s + R_m + R_c}{C} \bar{r} \right) \right]$$

La relation expérimentale de la figure 11 (courbe en tirets) est retracée en coordonnées semi-logarithmiques ($F_{opt.}$, log E_0) sur la figure 14 (il s'agit de logarithmes népériens dans le texte et des logarithmes décimaux sur les figures). L'ajustement à une droite est satisfaisant et les pentes extrêmes que l'on peut lui attribuer conduisent à des valeurs du coefficient d'extinction K comprises entre 0,66 et 0,77. Cette gamme des valeurs attribuées à K est en accord avec la valeur de K obtenue par une autre méthode à l'aide du profil lumineux (0,75).

Ces trois conséquences (*a*, *b*, *c*,) et particulièrement la dernière, permettent de justifier l'hypothèse émise : une culture de trèfle peut être assimilée à un couvert homogène si l'éclairement n'est pas trop intense.

222. *Amélioration génétique de la betterave*

L'étude maintenant classique de WATSON et WITTS (1959) souligne le rôle du port et de l'indice foliaire dans la production de matière sèche ; il convient d'en rappeler les grandes lignes. WATSON et WITTS ont tout d'abord établi que l'assimilation nette de l'unité de surface foliaire était du même ordre pour la betterave sauvage et la betterave sélectionnée. L'amélioration n'aurait donc pas porté sur l'assimilation nette de la feuille. Si la surface foliaire est importante ($F > 3$), la production de la betterave sauvage devient très faible devant celle de la betterave cultivée. Or, on observe que la betterave sauvage a ses feuilles étalées en rosette, alors que dans le cas de la betterave cultivée, les feuilles jeunes sont dressées au centre du bouquet. Dans l'hypothèse, très schématique, d'un couvert homogène, cela revient à attribuer au coefficient d'extinction K une valeur élevée dans le cas de la betterave sauvage. L'indice foliaire optimal est donc beaucoup plus faible dans le premier cas que dans le second et la production maximale également (voir fig. 5). L'amélioration génétique, au moins en ce qui concerne la production de matière sèche, a consisté à réaliser des variétés à port dressé. Cet exemple souligne le rôle fondamental de la répartition de la lumière entre les différentes feuilles dans la production de matière sèche du couvert végétal.

L'ensemble de ces faits expérimentaux forme une première justification à l'emploi du modèle et par conséquent confirme la validité des équations 6 et 7 dans un certain nombre de cas.

III. — TRANSPIRATION DE L'UNITÉ DE SURFACE DE FEUILLE

31. *Expression de la transpiration T*

La transpiration par unité de surface de feuille est un flux de vapeur d'eau qui s'exprime en fonction d'un gradient de potentiel (ici, un gradient de concentration en vapeur d'eau) et de résistance à la diffusion

$$T = \frac{C(\theta_f) - C(\theta_r)}{R'_a + R'_s} \qquad (8)$$

T transpiration,

$C(\theta_f)$ concentration en vapeur saturante à la température de la feuille (l'air est pratiquement saturé dans la cavité sous-stomatique),

$C(\theta_r)$ concentration en vapeur saturante à la température du point de rosée, ou concentration réelle en vapeur d'eau de l'air extérieur,

R'_a Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau dans l'air extérieur et particulièrement dans la couche limite,

R'_s Résistance stomatique et cuticulaire à la diffusion de la vapeur d'eau.

L'étude physique de la transpiration au niveau de la feuille, (R. J. BOUCHET, 1963), permet d'écrire que $(R'_a + R'_s)$ est proportionnel, d'une part à l'épaisseur de la couche limite qui dépend de la vitesse du vent ainsi que de la forme et de la rugosité de la feuille, d'autre part au coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau D'. Une étude similaire de la diffusion du gaz carbonique conduit à exprimer la somme $(R_a + R_s)$ des résistances à la diffusion du gaz carbonique en fonction de l'épaisseur de la couche limite et du coefficient de diffusion moléculaire du gaz carbonique. Il existe un rapport constant entre les résistances à la diffusion de la vapeur d'eau et du gaz carbonique et pour simplifier les écritures, on les exprimera toutes par les symboles R_a et R_s et l'on posera :

$$R = R_a + R_s$$

32. *Régulation stomatique*

La régulation stomatique peut être due à un éclairement insuffisant, à une concentration en gaz carbonique élevée ou à un déséquilibre hydrique entre la demande de vapeur d'eau au niveau de la feuille (évaporation potentielle) et la quantité d'eau liquide que la plante peut puiser dans le sol (transpiration réelle). Ce dernier phénomène lie directement la transpiration à la photosynthèse. En effet, la régulation stomatique se traduit par une augmentation de la somme des résistances, R et conduit à une réduction aussi bien de la transpiration que de la photosynthèse. On exprimera le degré de régulation stomatique par le rapport de la somme R_1 des résistances correspondant aux stomates ouverts sur la somme R des résistances correspondant aux stomates partiellement ou complètement fermés :

$$\frac{R_1}{R} \leqslant 1$$

Pour un grand nombre de feuilles, la transpiration maximale T_1, correspondant aux stomates ouverts (R_1) est pratiquement égale à l'évaporation d'une nappe d'eau libre ayant le même albédo (pourcentage d'énergie rayonnante réfléchie par rapport à l'énergie rayonnante incidente) et les mêmes dimensions. En fait les variations du terme R_1 d'une feuille à l'autre, dépendent essentiellement de ses dimensions, du nombre de stomates et de la nature de la surface. Par exemple, une feuille étroite présentera une valeur de R_1 plus faible qu'une feuille large.

Le rapport R_1/R exprime directement l'augmentation de résistance à la diffusion du gaz carbonique vers les chloroplastes. Par contre, en ce qui concerne la transpiration, il ne traduit pas directement la réduction du flux de vapeur d'eau ainsi que pourrait le laisser supposer une simple lecture de la relation (8). En effet, la transpiration, contrairement à la photosynthèse, étant un terme important du bilan d'énergie, toute modification de transpiration affecte les autres termes du bilan et tout particulièrement la température de la feuille. A conditions extérieures égales, une réduction de la transpiration entraîne un échauffement de la feuille. Cette augmentation

de température a pour conséquence d'accroître la concentration saturante en vapeur d'eau $C(\theta_f)$ dans la cavité sous-stomatique. La régulation stomatique se traduit donc en ce qui concerne la transpiration à la fois par une augmentation des résistances (dénominateur de la relation (8)) et par une augmentation corrélative du déficit de saturation (numérateur de la relation (8)). La réduction de transpiration est ainsi moins élevée que l'augmentation des résistances ne le laissait prévoir.

Soit, ε, le rapport de la transpiration T correspondant aux stomates partiellement ou complètement fermés sur la transpiration T_1 correspondant aux stomates ouverts :

$$\varepsilon = \frac{T}{T_1} > \frac{R_1}{R} \tag{9}$$

TABLEAU I

Valeurs du coefficient $\lambda(\theta)$ *en fonction de* θ

$$\lambda(\theta) = \frac{LDF'(\theta)}{K\beta}$$

$$\theta = \frac{\theta a + \theta r}{2}$$

(D'après R. J. BOUCHET, 1963)

Température θ en °C	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Coefficient $\lambda(\theta)$....	0,81	0,84	0,87	0,89	0,92	0,95	0,98	1,01	1,04	1,07
Température θ.....	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
Coefficient $\lambda(\theta)$....	1,11	1,14	1,17	1,21	1,25	1,28	1,32	1,36	1,40	1,44
Température θ.....	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5
Coefficient $\lambda(\theta)$....	1,49	1,53	1,57	1,62	1,66	1,71	1,76	1,81	1,86	1,92
Température (θ).....	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5	19,0	19,5
Coefficient $\lambda(\theta)$....	1,97	2,03	2,08	2,14	2,20	2,26	2,32	2,39	2,45	2,52
Température (θ).....	20,0	20,5	21,0	21,5	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0	24,5
Coefficient $\lambda(\theta)$....	2,59	2,66	2,73	2,80	2,88	2,96	3,03	3,11	3,20	3,28
Température (θ)	25,0	25,5	26,0	26,5	27,0	27,5	28,0	28,5	29,0	29,5
Coefficient $\lambda(\theta)$....	3,36	3,45	3,54	3,63	3,72	3,82	3,92	4,01	4,11	4,22

Tableau obtenu d'après la formule $\frac{LDF'(\theta)}{K\beta}$

$L = 597{,}3 - 0{,}566 \cdot \theta$

$D = \frac{0{,}622}{760} 10^{-4} (2{,}884 + 0{,}008\,41 \cdot \theta)$

$K = (0{,}580 + 0{,}016\,82 \cdot \theta)10^{-4}$. Dans ce tableau, β a été pris égal à un. Ce qui revient à confondre les couches limites relatives à la vapeur et à la température.

L'estimation de $F'(\theta)$ à partir des tables de $F(\theta)$ et l'ajustement polynominal de $\lambda(\theta)$ en fonction des constantes ci-dessus et de θ a été réalisé par le service de Biométrie de l'I. N. R. A.

R. J. BOUCHET (1963) a établi la relation existant entre ε et $\frac{R_1}{R}$:

$$\varepsilon = \frac{R_1}{R}\left(\frac{1+\lambda}{1+\frac{R_1}{R}\lambda}\right) \tag{10}$$

avec

$$\lambda = \frac{LDF'(\theta)}{K\beta}$$

L, Chaleur latente de vaporisation de l'eau,

D Coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau,

F'(θ) Pente de la tangente de la courbe représentative de la tension de vapeur saturante en fonction de la température au point $\theta = \frac{\theta a + \theta r}{2}$,

θ_a, température de l'air,

θ_r, température du point de rosée,

K Coefficient de conductivité moléculaire de la chaleur par l'air sec,

β facteur égal au rapport des épaisseurs des couches limites relatives aux échanges de vapeur d'eau et de chaleur.

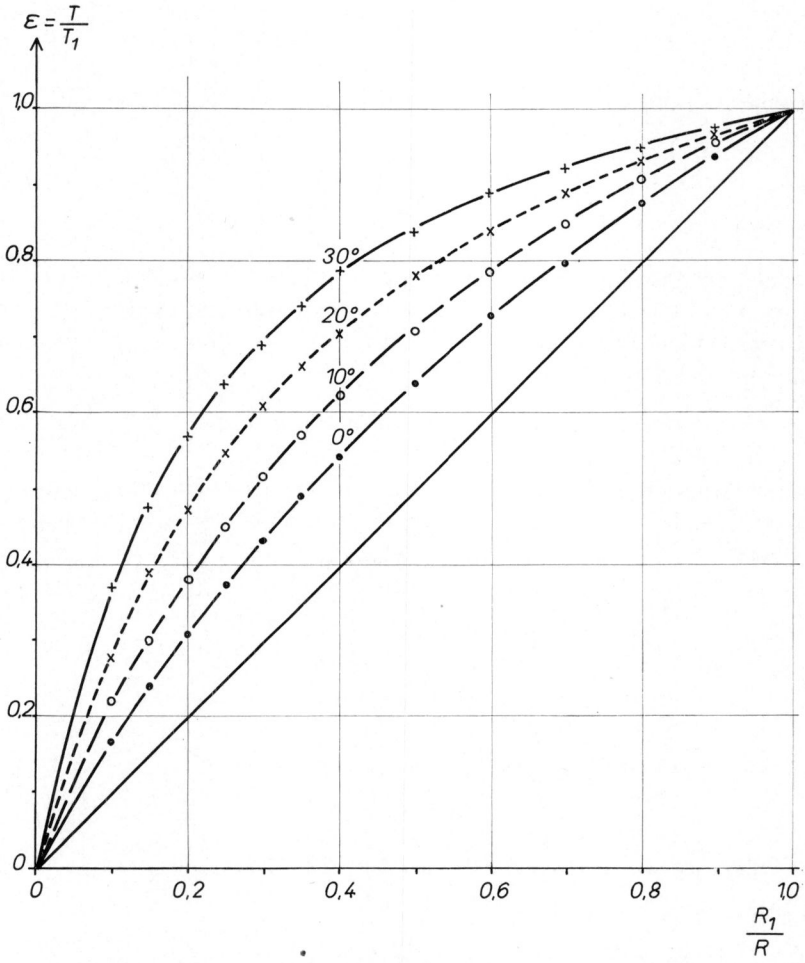


FIG. 15. — *Variations de* ε *en fonction de* R_1/R *pour différentes valeurs de la température et de l'humidité de l'air* (d'après R. J. BOUCHET, 1963)

Le tableau I et la figure 15 permettent d'obtenir ε à partir de R_1/R connaissant la température de l'air et celle du point de rosée.

L'ensemble des résultats précédents est relatif à une unité de surface de la feuille. Il faut en retenir la différence entre le degré de régulation stomatique R_1/R, directement lié à la photosynthèse et la réduction de la transpiration.

IV. — PHOTOSYNTHÈSE ET TRANSPIRATION DE LA FEUILLE

Dans l'expression de la photosynthèse de l'unité de surface de feuille (relation (3)) les résistances R_a, R_s, R_m et R_c, se divisent en deux groupes : l'un comprenant les résistances R_a et R_s qui sont communes à la transpiration et à la photosynthèse, l'autre, les résistances R_m et R_c, qui sont propres à la photosynthèse. On posera :

$$R_a + R_s = R$$
$$R_m + R_c = R'$$

La relation (3) s'écrit alors

$$P = \frac{\alpha E \dfrac{C}{R + R'}}{\alpha E + \dfrac{C}{R + R'}} \qquad (3')$$

Si une certaine régulation stomatique se produit, la résistance R augmente ; or la relation (10) fournit une expression de R en fonction de ε (rapport de la transpiration T correspondant aux stomates fermés sur la transpiration T_1 correspondant aux stomates ouverts) :

$$R = \frac{R_1}{\varepsilon}\left[1 + \lambda - \lambda\,\varepsilon\right] \qquad (10')$$

L'élimination du terme R entre les relations (3′ et 10′) fournit une expression de la photosynthèse de l'unité de surface de feuille en fonction de ε (CHARTIER, HALLAIRE, 1967). Il vient :

$$P = \frac{\alpha EC\,\varepsilon}{(\alpha ER' - R_1\,\lambda\,\alpha E + C)\,\varepsilon + \alpha ER_1\,(1 + \lambda)} \qquad (11)$$

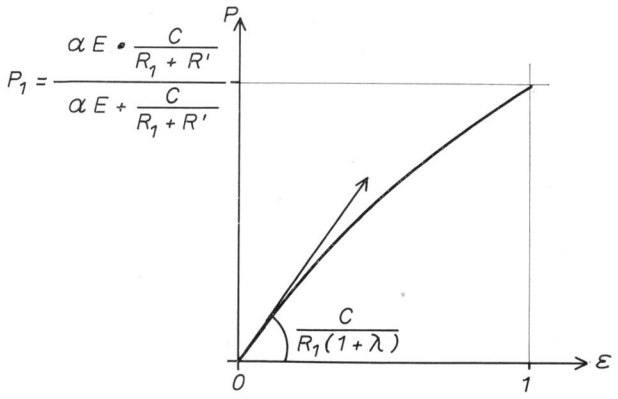


FIG. 16. — *Photosynthèse de l'unité de surface de feuille P et réduction de la transpiration* ε
(d'après CHARTIER, HALLAIRE, 1967)

Le terme ε traduit en particulier les réactions de la feuille aux conditions d'alimentation en eau. L'expression 11 permet donc d'étudier les effets de ces dernières sur la photosynthèse P, compte tenu des autres facteurs.

La courbe représentative de P en fonction de ε, les autres facteurs, (C, E, R', λ, R_1) étant supposés constants, est une branche d'hyperbole (fig. 16). Cette courbe passe par l'origine et sa tangente en ce point a pour valeur :

$$\left(\frac{dP}{d\varepsilon}\right)_0 = \frac{C}{R_1\ (1 + \lambda)}$$

Si les termes C et λ sont imposés par le milieu, par contre, la résistance R_1 correspondant aux stomates ouverts, est un terme qui dépend à la fois de la taille et de la nature de la surface foliaire (rugosité) et des conditions de ventilation.

Par ailleurs, pour la valeur de ε égale à l'unité (R atteignant alors sa valeur minimale R_1), la photosynthèse prend sa valeur maximale P_1 :

$$P_1 = \frac{\alpha E \dfrac{C}{R_1 + R'}}{\alpha E + \dfrac{C}{R_1 + R'}}$$

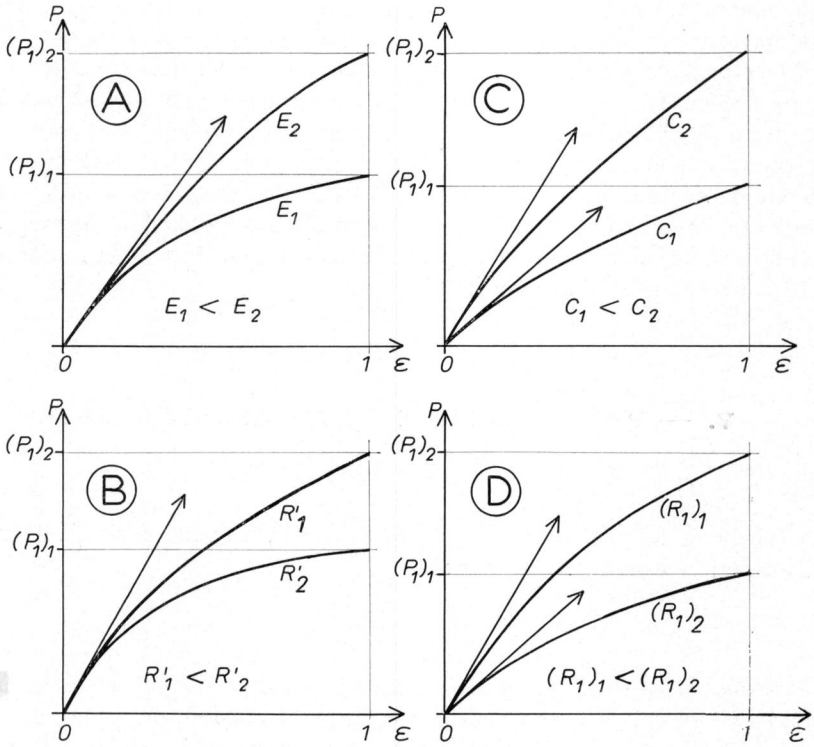


FIG. 17. — *Photosynthèse de l'unité de surface de feuille P en fonction de la réduction de la transpiration* ε *pour diverses valeurs de* :

A. — l'éclairement E ;
B. — $R' = R_m + R_c$ (morphologie, alimentation minérale, âge, etc.) ;
C. — la concentration en gaz carbonique C ;
D. — $R_1 = R_a + R_s$ lorsque les stomates sont ouverts (turbulence, dimension de la feuille).
(d'après CHARTIER, HALLAIRE, 1967)

La concavité de la courbe représentative de la relation (11) dépend du signe de l'expression $[\alpha ER' - R_1\alpha\lambda E + C]$. Si ce terme est positif, la concavité est tournée vers le bas (fig. 16), s'il est négatif, la concavité est tournée vers le haut, s'il est nul, l'équation (11) est celle d'une droite.

La pente de la courbe en chacun de ses points fournit une indication de l'efficacité d'une meilleure alimentation en eau. L'effet des différents paramètres (E, C, R', R_1) sur l'efficacité de l'eau apparaît schématiquement sur la figure 17. Les familles de courbes ainsi obtenues se divisent en deux groupes : le premier groupe de courbes (paramètres E ou R') est caractérisé par une tangente commune à l'origine ; le second (paramètre R_1 ou C), par une tangente à l'origine qui dépend de la valeur du paramètre (R_1 ou C). Il s'ensuit évidemment, en étendant ces résultats de la feuille à la culture, qu'une amélioration de la production peut être obtenue aussi bien par la modification des conditions d'alimentation en eau que par celle des autres facteurs (E, C, α, R', R_1, λ) lorsque ε est voisin de l'unité (ce qui arrive fréquemment en zones irriguées ou sous climat subhumide). Les interactions y sont donc la règle générale et sur le plan pratique, elles imposent des dispositifs expérimentaux où interviennent non seulement le mode d'apport d'eau, mais les fumures minérales, la densité de semis, les variétés, etc.

Par contre, dans le cas où ε est toujours très faible (zone aride non irriguée), il y a interaction entre ε d'une part, C et R_1 d'autre part, ce qui se traduit (fig. 17 C et D) par des tangentes à l'origine différentes. Dans ces conditions, une amélioration de la production est possible sans apport d'eau, grâce à une augmentation de la concentration en gaz carbonique de l'air par exemple ; les modalités d'un tel apport restant encore à définir. L'interaction disparaît entre ε et les deux facteurs E et R', les différentes courbes (fig. 17 A et B) ayant les mêmes tangentes à l'origine. Dans ce dernier cas, l'alimentation en eau est le seul facteur possible d'amélioration. Celà peut expliquer par exemple les effets pratiquement négligeables de la fumure (paramètre R') en zone aride non irriguée.

V. — PHOTOSYNTHÈSE ET ÉVAPOTRANSPIRATION DU COUVERT VÉGÉTAL

A l'échelle de la culture et non plus de la feuille, les conditions d'alimentation en eau peuvent être caractérisées par :

$$\varepsilon' = \frac{ETR}{ETR_1}$$

Les termes ETR et ETR_1 désignant respectivement l'évapotranspiration réelle (analogue au terme T de la relation (9)) et l'évapotranspiration de la culture si les stomates sont ouverts au maximum (analogue au terme T_1).

Dans l'étude de la photosynthèse du couvert végétal, on avait admis dans les calculs que la régulation stomatique était constante sur toute la hauteur de la végétation. Même si l'on retient cette hypothèse, il est difficile d'établir une relation entre $\varepsilon'(ETR/ETR_1)$ et $\varepsilon(T/T_1)$. En effet, s'il est tout d'abord évident que l'évapotranspi-

ration réelle ETR est la somme des transpirations réelles T :

$$ETR = \Sigma T$$

par contre, l'évapotranspiration maximale ETR_1 qui traduirait l'ouverture des stomates sur tout le profil n'est pas égale à la somme des transpirations maximales T_1. Ceci tient au fait que pour une feuille donnée, l'ensemble des autres feuilles jouent plus ou moins bien le rôle d'un humidificateur d'ambiance. En règle générale, on peut écrire :

$$ETR_1 \leqslant \sum T_1$$

Cependant pour simplifier les calculs, on admettra que par la suite l'égalité est réalisée. Il vient alors :

$$\varepsilon' = \frac{ETR}{ETR_1} = \frac{T}{T_1} = \varepsilon \qquad (12)$$

Il faut souligner qu'à l'échelle d'une culture, la définition du terme ε' n'est qu'approximative.

En tenant compte de la simplification ($ETR_1 = \Sigma T_1$), on peut établir une relation entre la photosynthèse de la culture et ses conditions d'alimentation en eau définie par ε'. Une telle relation permet d'introduire deux nouveaux paramètres, en plus de ceux déjà étudiés au niveau de la feuille : l'indice foliaire F et le coefficient d'extinction de la lumière K, représentatif du port de la plante en particulier. Ces paramètres sont sensibles aux interventions agronomiques classiques (amélioration génétique pour le port, fumure azotée, densité de semis et irrigation pour l'indice foliaire).

L'expression de la photosynthèse du couvert végétal P′ telle qu'elle apparaissait dans la relation (6), s'écrit maintenant (en remplaçant $R_a + R_s$ par R et $R_m + R_c$ par R′) :

$$P' = p + \bar{r}F = \frac{C}{K(R + R')} \operatorname{Log} \left[\frac{1 + \frac{K}{C}(R + R') \alpha E_0}{1 + \frac{K}{C}(R + R') \alpha E_0 e^{-KF}} \right] \qquad (6')$$

Par ailleurs, en supposant que R est identique sur toute la hauteur du couvert et qu'il en est de même du coefficient ε, la résistance R qui apparaît dans la formule (6′) peut s'exprimer à l'aide de la relation (10′) déjà établie au niveau de la feuille :

$$R = \frac{R_1}{\varepsilon}[1 + \lambda - \lambda\varepsilon]$$

L'élimination de R entre les deux expressions (6′) et (10′) fournit une relation entre P′ et ε :

$$P' = p + \bar{r}F = \frac{1}{K\left(\frac{R_1}{\varepsilon}(1 + \lambda - \lambda\varepsilon) + R'\right)} \operatorname{Log} \left[\frac{1 + \frac{K}{C}\left(\frac{R_1}{\varepsilon}(1 + \lambda - \lambda\varepsilon) + R'\right) \alpha E_0}{1 + \frac{K}{C}\left(\frac{R_1}{\varepsilon}(1 + \lambda - \lambda\varepsilon) + R'\right) \alpha E_0 e^{-KF}} \right] \qquad (13)$$

La représentation graphique de la relation ainsi obtenue (fig. 18) fait apparaître les caractéristiques suivantes :

— la courbe passe par l'origine et sa tangente en ce point a pour valeur,

$$\left(\frac{dP'}{d\varepsilon}\right)_o = \frac{CF}{R_1\ (1 + \lambda)}$$

— pour la valeur de ε égale à l'unité, la photosynthèse prend sa valeur maximale P'_1,

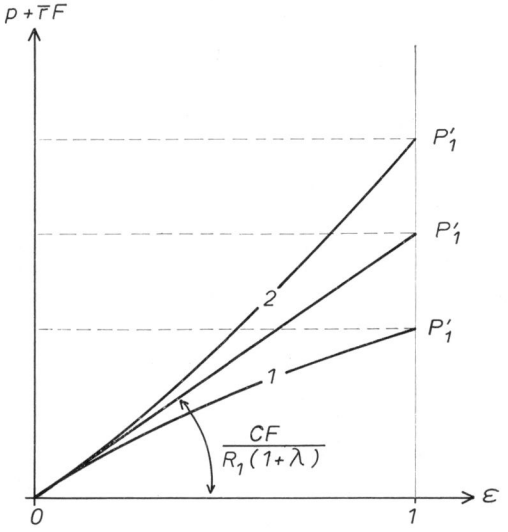


FIG. 18. — *Photosynthèse du couvert végétal* ($P' = p + \bar{r}F$) *et réduction de l'évapotranspiration* ε

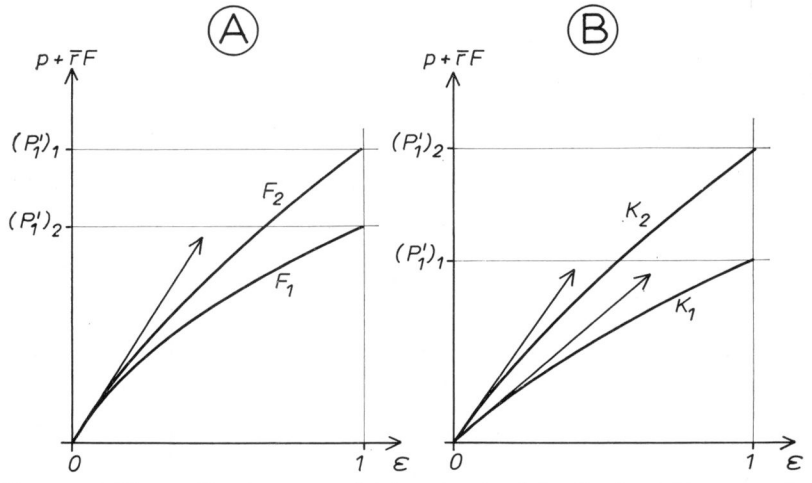


FIG. 19. — *Photosynthèse du couvert végétal en fonction de la réduction de l'évapotranspiration pour diverses valeurs de :*

A. — l'indice foliaire F ;
B. — le coefficient d'extinction de la lumière K (inclinaison des feuilles).

(d'après CHARTIER, HALLAIRE, 1967)

— la concavité des courbes peut être dirigée vers le haut (courbe 2) ou vers le bas (courbe 1).

Il faut remarquer par ailleurs que les courbes $P'(\varepsilon)$ ne fournissent une indication de l'efficience d'un apport d'eau que si la valeur de ETR_1 est déterminée. En effet si l'efficience de l'eau est donnée par le quotient de la photosynthèse P' sur la consommation effective ETR, l'efficience d'un apport d'eau quant à elle s'exprime de la manière suivante, compte tenu de la relation 12 :

$$\frac{dP'}{dETR} = \frac{dP'}{d\varepsilon}\,\frac{1}{ETR_1}$$

L'efficience d'un apport d'eau, notion d'une importance agronomique capitale, apparaît comme le produit de deux termes dont l'un $\left(\frac{dP'}{d\varepsilon}\right)$ est particulièrement affecté par les niveaux auxquels se situent les autres facteurs (R, R_1, C, E, K, F). Les effets de (R', R_1, E et C) sont les mêmes que dans le cas de la feuille (fig. 17). Les effets du coefficient d'extinction de la lumière K, représentatif du port de la plante et de l'indice foliaire F sont indiqués sur la figure 19. Les types des deux familles de courbes sont différents (les pentes à l'origine demeurent les mêmes pour F variable et sont différentes pour K variable), ce qui appelle les mêmes remarques que celles concernant la figure 17.

Pour préciser ces résultats théoriques, il nous est apparu intéressant de partir d'un cas particulier, puis d'indiquer comment la courbe $P'(\varepsilon)$ varie si un seul fa teur se trouve modifié. Le cas particulier retenu est défini par les valeurs suivantes des différents facteurs :

Caractéristiques de la photosynthèse de la feuille

$R_1 = R_a + R_s = 4$ s cm^{-1}, résistances de l'air et stomatique à la diffusion du CO_2 (valeur élevée pour R_1),

$R' = R_m + R_c = 2$ s cm^{-1}, résistances du mésophylle et à la carboxylation (valeur moyenne pour R'),

$\alpha = 1{,}6{,}10^{-12}$ g de CO_2 par erg, rendement lumineux maximal de la photosynthèse (valeur peu variable entre les espèces).

Caractéristiques du couvert

F = 4 indice foliaire,

K = 0,45 coefficient d'extinction de l'énergie lumineuse.

Caractéristiques climatiques

$E = 15.10^4$ erg cm^{-2} s^{-1}, énergie lumineuse incidente ($0{,}4\ \mu < \lambda < 0{,}7\ \mu$), ce qui correspond à un rayonnement global G de 0,5 cal cm^{-2} mn^{-1} environ,

$C = 60.10^{-8}$ g cm^{-3}, concentration de l'air en gaz carbonique (0,031 p. 100),

$\theta = \frac{\theta_a + \theta_r}{2} = 20°$, θ_a étant la température de l'air, θ_r étant la température du point de rosée.

La courbe $P(\varepsilon)$ est alors celle représentée en trait épais, figures 20 et 21. Imaginons maintenant une variation de tel ou tel paramètre pris séparément. Une mauvaise

alimentation minérale par exemple peut faite passer ($R_m + R_c$) soit R′ de 2 à 6 cm^{-1} sec (fig. 20). Une modification de l'éclairement E exprimé par le rayonnement global G (de 0,5 à 0,9 ou de 0,5 à 0,2 cal cm^{-2} mn^{-1}) conduit à des courbes P(ε) très différentes (fig. 20). Les variations de ($R_m + R_c$), soit R′ et de E ou (G) conduisent comme on l'a déjà montré à des familles de courbes ayant une même tangente à l'origine (fig. 20). Il en est de même si l'on imagine une variation du coefficient d'extinction K, caractéristique en particulier du port de la plante. Quant aux variations de $R_a + R_s$, soit R_1 et de l'indice foliaire F (fig. 21), elles conduisent à des familles de courbes ayant des tangentes à l'origine différentes. Par ailleurs, les conclusions auxquelles nous avons abouties quant à l'importance respective de tel ou tel

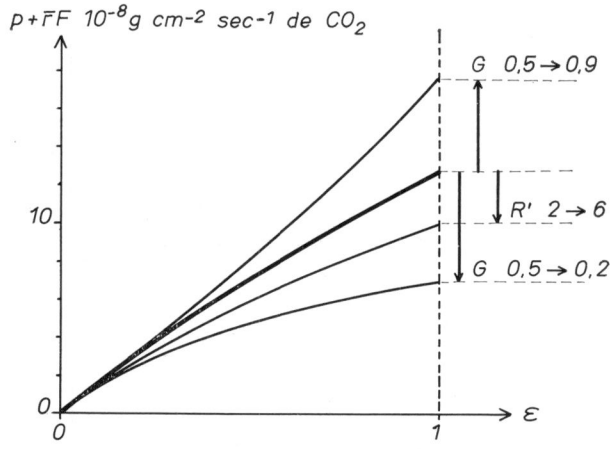


FIG. 20. — *Photosynthèse du couvert végétal en fonction de* ε.

La courbe en trait épais est relative au cas particulier envisagé dans le texte. Les courbes en trait fin indiquent les effets d'une modification du rayonnement global (de 0,5 à 0,9 et de 0,5 à 0,2 cal cm^{-2} mn^{-1}) et de la résistance à la carboxylation (de 2 à 6 s cm^{-1}).

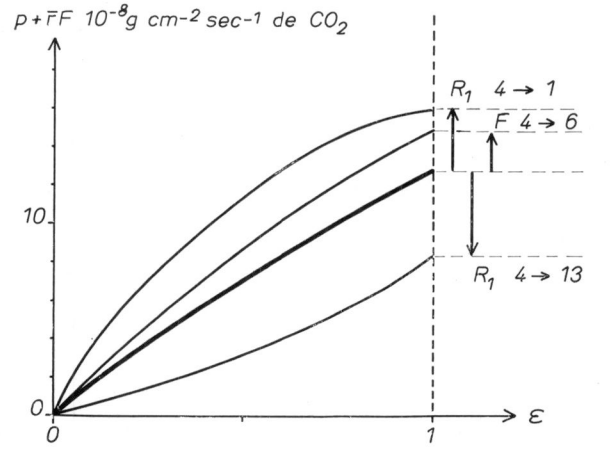


FIG. 21. — *Photosynthèse du couvert végétal en fonction de E*

La courbe en trait épais est relative au cas particulier envisagé dans le texte. Les courbes en trait fin indiquent les effets d'une modification de R_1 (dimensions de la feuille, turbulence, etc.) et de l'indice foliaire F.

facteur sur l'efficicence d'un apport d'eau en fonction des conditions de milieu (zones à climat subhumide et zones irriguées ou zones arides non irriguées) demeurent valables lorsque l'on considère la production du couvert végétal au lieu de la photosynthèse de la feuille.

Il convient de souligner pour finir les insuffisances inhérentes à l'emploi du terme ε. Ce terme n'est pas indépendant de certains des paramètres considérés (E ou R_1 par exemple) et toute modification de ces derniers se traduit non seulement par le passage d'une courbe à une autre (fig. 17 et 19), mais également par une modification de la valeur de ε. Aussi, le prolongement normal de la présente étude consistera-t-il à bien séparer dans l'étude de l'influence des conditions d'alimentation en eau sur la photosynthèse du couvert végétal, les termes d'alimentation proprement dits (humidité du sol, enracinement), le rayonnement global, le déficit de saturation de l'air et la vitesse du vent. Néanmoins dans cette analyse plus poussée, le terme ε est un intermédiaire indispensable. De plus, le terme ε a été employé à l'occasion d'un certain nombre d'études expérimentales (ROBELIN, 1961 ; BOUCHET, de PARCEVAUX, ARNOUX, 1963 ; DAMAGNEZ, 1966), la représentation proposée devrait contribuer à en faciliter l'interprétation bien que l'on ait utilisé en général des valeurs moyennes sur l'ensemble du cycle de végétation.

CONCLUSIONS

On ne verra pas, dans l'étude théorique qui vient d'être faite, une proposition de représentation fidèle de la réalité. L'intérêt d'une telle analyse qui, rappelons-le, s'applique à un instant donné, est tout d'abord de classer un certain nombre de faits expérimentaux et d'offrir ensuite à chaque spécialiste d'une culture donnée la possibilité de trouver de nouvelles hypothèses de travail. Ce dernier point mérite d'être précisé. On peut en effet constater que les progrès agronomiques les plus marquants dans la production de matière sèche des cultures ont consisté à jouer sur les facteurs limitants les plus efficaces : la nutrition minérale, l'eau en régions arides, la température dans les serres en hiver ... Les modalités exactes de ces actions restent encore à préciser pour chaque culture et en chaque lieu, mais la massive élévation de production qui en résulte est un fait acquis. Il faut constater par ailleurs que la plupart des essais agronomiques actuels, sur des végétaux connus, et ne portant que sur un seul facteur conduisent le plus souvent à des différences de rendement faibles quel que soit le facteur envisagé. C'est ainsi que le terme même de facteur limitant n'est peut-être plus très approprié à partir du moment où un des facteurs pris isolément n'a plus un rôle décisif dans la production de matière sèche. Plus précisément, et l'étude théorique qui vient d'être faite le met en évidence, une augmentation de production du même ordre peut être obtenue en modifiant séparément tel ou tel autre facteur. Il n'y a donc plus un seul facteur limitant, mais une combinaison de facteurs dont les actions ne sont pas indépendantes ; les conditions optimales de production impliquent une modification simultanée de l'ensemble. Par exemple, les nombreuses expériences d'irrigation portant sur la dose, la répartition, la fréquence, ne devraient plus être considérées isolément, mais en liaison avec l'alimentation minérale, la densité de

semis, les variétés, etc..., qui se traduiront à la lumière de la présente étude par la modification d'un ou de plusieurs paramètres.

Soulignons pour finir que l'analyse proposée qui traduit l'intensité de la production à l'échelle instantanée, appelle pour être transposable directement sur le plan agronomique, une intégration dans le temps. A cet égard, il sera nécessaire d'étudier systématiquement les variations des paramètres ou facteurs considérés selon le potentiel génétique et les conditions de milieu parmi lesquelles le terme température doit prendre une importance particulière.

Reçu pour publication en janvier 1967.

SUMMARY

LIGHT, WATER AND DRY MATTER PRODUCTION OF A PLANT COVER

This article attempts to coalesce in a single expression the effects of light, water availability and carbon-dioxide concentration on the dry matter production of a plant cover, at a given time.

The use of a theoretical outline of photosynthesis and transpiration is vindicated in the preamble.

In section I, various results obtained previously are reviewed (CHARTIER, 1966 *b* et *c*; CHARTIER, HALLAIRE, 1967) which refer to expressing the intensity of photosynthesis per unit area of leaf in terms of the absorbed luminous energy « E » and the concentration of carbon dioxide in air « C » (relations 2 and 3, fig. 2 and 3). The parameters needed which relate either to the environmental conditions or the anatomical or physiological properties of the leaf are as follows ;

i) air resistance « R_a », dependent on the size of the leaf and micro-turbulence in its vicinity :

ii) the stomatal resistance « R_s » ;

iii) resistance to the diffusion of CO_2 within the mesophyll « R_m » ;

iv) resistance to carboxylation, « R_c », which reveals the biochemical restraints caused by the temperature, the mineral nutrition and the physiological condition, e. g., age ;

v) the maximum efficiency of light energy conversion α, which depends chiefly on the nature of the pigments and their concentration.

In section II, the work accomplished by MONSI and SAEKI is reviewed and analyzed under the light of the results set forth supra : this work refers to the photosynthesis of the plant cover in terms of the distribution of light between the leaves (relation 8, fig. 4 to 10). This theoretical work is completed by various experimental results (STERN and DONALD, 1962, *a* and *b*), (fig. 11 to 14). In addition, besides parameters relating to the photosynthesis of a leaf, two others, inherent in the plant cover, are made clear :

i) the foliage index F (or LAI) ;

ii) the light-extinction factor « K » that depends on the inclination direction of the leaves and their optical properties.

Section III reviews the work of R. J. BOUCHET (1963) relating to the effect of stomatic control on transpiration (relation 10, fig. 15).

Section IV deals with the influence of water availability on photosynthesis of the leaf (CHARTIER, HALLAIRE, 1967). This study was undertaken thanks to the introduction of the parameters « R_a » and « R_s » in a production formula (cf. abstract of section I, supra). In addition, water availability is featured by the ratio ε of the actual transpiration of the leaf to that, maximal, did its stomata remain open. The effects of the environment factors and of the anatomical and physiological feature of the leaf on the efficiency of water are clearly evinced (relation 11, fig. 15 and 17).

The last section extends the foregoing results to the dry matter production of a plant cover. Again, the effects of the parameters « F » and « K » on the efficiency of water are patent (relation 12, fig. 18 to 22).

The writer then attempts to take from the foregoing study a number of agricultural consequences relating more particularly to the magnitude and the meaning of interactions between the production factors.

ZUSAMMENFASSUNG

BELEUCHTUNG, WASSERVERSORGUNG UND ERZEUGUNG VON TROCKENMASSE DER PFLANZENDECKE

Dieser Aufsatz ist ein Versuch, die Wirkungen des Lichtes, der Wasserversorgung und der Kohlensäurekonzentration auf die Erzeugung der Trockenmasse einer Pflanzendecke in einem bestimmten Augenblick gemeinsam auszudrücken.

In der Einleitung rechtfertigt der Verfasser die Anwendung eines theoretischen Schemas in den Untersuchungen über Photosynthese und Transpiration.

Im ersten Teil wird an einige früher aufgestellte Ergebnisse (CHARTIER 1966, *b* und *c*; CHARTIER-HALLAIRE, 1967) erinnert. Sie betreffen die Darstellung der Photosynthese-intensität pro Blattflächeneinheit im Verhältnis zur Kohlensäurekonzentration der Luft C (Referenzen 2 und 3 ; Abb. : 2 und 3). Die Parameter, die man einzuführen veranlasst ist, und die entweder die Milieubedingungen oder die anatomischen oder physiologischen Eigenschaften des Blattes betreffen, sind die Folgenden :

— der Luftwiderstand R_a, der von den Abmessungen des Blattes und von der Mikroturbulenz in seiner Umgebung abhängig ist ;

— der Porenwiderstand R_s ;

— der Widerstand gegenüber der Diffusion des CO_2 in dem Mesophyllum R_m ;

— der Widerstand gegenüber der Carboxylation Rc, der die Hemmungen biochemischer Natur auf Grund der Temperatur gegenüber der mineralischen Versorgung im physiologischen Zustand (z. B. : Alter) ausdrückt ;

— der maximale Lichtwirkungsgrad der Photosynthese α, der im Wesentlichen von der Natur der Pigmente und ihren Konzentrationen abhängig ist.

Im zweiten Teil, wird an die Arbeiten von MONSI und SAEKI erinnert, die an Hand der oben erwähnten Ergebnisse ausführlich erörtert werden. Diese Arbeite beziehen sich auf die Photosynthese der Pflanzendecke in Abhängigkeit mit der Verteilung des Lichtes unter den Blättern (Referenz 6, Abb. : 4 bis 10). Einige experimentale Ergebnisse (STERN und DONALD, 1962, *a* und *b*) vervollständigen diese theoretische Arbeit (Abb. : 11, bis 14). Ausser den Parametern, die die Photosynthese eines Blattes betreffen, wird auf zwei andere die Pflanzendecke betreffende Parameter hingewiesen :

— der Blattindex F (oder L A I) ;

— der Auslöschungskoeffizient des Lichtes K, der von der Neigung der Blätter, und von ihren optischen Eigenschaften abhängig ist.

Im dritten Teil, wird an die Arbeiten von R. J. BOUCHET (1963) über die Wirkung der Porenregulierung auf die Ausdünstung (Referenz 10, Abb. : 15) erinnert.

Im vierten Teil, wird der Einfluss der Wasserversorgung auf die Photosynthese des Blattes (CHARTIER, HALLAIRE, 1967) behandelt. Diese Untersuchung konnte dank der Einführung der Parameter R_a und R_s in eine Produktionsformel (s. den ersten Teil der Zusammenfassung) durchgeführt werden. Ausserdem, wurden die Bedingungen der Wasserversorgung durch die Beziehung ε der wirklichen Blattausdünstung im Verhältnis zur vermutlichen Höchstausdünstung für den Fall offen bleibender Poren dargestellt. Die Einwirkung der Milieufaktoren und der anatomischen und physiologischen Eigenschaften des Blattes auf die Wirksamkeit des Wassers tritt auch deutlich hervor (Referenz 11, Abb. : 16 und 17).

Im letzten Teil werden die oben aufgeführten Ergebnisse auf die Produktion von Trockenmasse der Pflanzendecke erweitert. Die Einwirkung der Parameter F und K auf die Wirksamkeit des Wassers ist ebenfalls dargestellt (Referenz 12, Abb. : 18 bis 22).

Der Verfasser unternimmt, aus der soeben durchgeführten Untersuchung, eine gewisse Anzahl agronomischen Schlussfolgerungen zu ziehen, die sich besonders auf die Grösse und die Richtung der gegenseitigen Wirkungen zwischen den Produktionsfaktoren beziehen.

Свет, влага, и продукция сухой массы растительным покровом.

Ф. ШАРТЬЕ.

РЕЗЮМЭ

Данная работа представляет попытку выразить в одной формуле эффект освещения, водного питания и концентрации углекислоты, на продукцию сухой массы растительным покровом в данный момент.

Во вступлении, автор старается оправдать применение определенной теоритической схемы, при изучениях фотосинтеза или транспирации.

В первой части работы он напоминает некоторые результаты полученные в пред'идущих работах (Шартье 1966 в и с, Шартье и Халлер 1967), относящиеся к выражению интенсивности фотосинтеза на единицу площади листа, в зависимости от поглощенной световой энергии (E) и от концентрации углекислоты в воздухе (C) [отношения 2 и 3, рисунки 2 и 3]. Вводимые параметры относятся или к условиям среды, илик анатомическим и физиологическим свойствам листа :

— сопротивление воздуха Ra зависящее от размеров листа и от микротурбулентности по соседству с листом;

— сопротивление устьиц Rs;

— сопротивление в мезофиле против диффузии CO_2 Rm;

— сопротивление против карбоксилирования Rc, отражающее торможение биохимического характера вызванное температурой, минеральными подкормками и физиологическим состоянием (например : возраст);

— максимальная световая эффективность фотосинтеза α, зависящая главным образом от природы пигментов и от их концентрации.

Во второй части, автор напоминает данные работ МОНСИ и САЭКИ, развивая их в свете указанных результатов; работы эти касаются интенсивности фотосинтеза, в зависимости от распределения света между листьями (отношение 6, рисунки 4-10). Несколько результатов экспериментов (СТЕРН и ДОНАЛЬД 1962 а и в) дополняют эту теоритическую часть работы (рисунки 11-14). Кроме параметров относящихся к фотосинтезу, автор выводит еще два параметра присущих растительному покрову :

— листовой признак F (или LAI);

— коэффициент тушения света K, зависящий от угла наклона листа и от его оптических свойств.

Третья часть — посвящена разбору работ Р. Ж. БУШЭ (1963) об эффекте автоматической регуляции на транспирацию (отношение 10, рисунок 15).

В четвертой части автор рассматривает влияние условий водного питания на фотосинтез листа (ШАРТЬЕ, ХАЛЛЕР 1967). Изучение это было проведено благодаря введению параметров Ra и Rs, в формулу продукции (см. резюме первой части). Кроме того, условия водного питания, характеризуются соотношением ε реальной транспирации листа к максимальной транспирации которую имел-бы лист, если-бы его устьица оставались постоянно открытыми. Влияние условий среды и анатомических или физиологических характерностей листа на эффективность влаги — выялены очень четко (отношение 11, рисунки 16 и 17).

И наконец, в заключительной части, полученные результаты применяются к продукции сухой массы растительным покровом и выявляется также действие параметров F и K на эффективность влаги (отношение 12, рисунки 18-22).

Кроме того, автор пытается вывести из данной работы несколько заключений агрономического характера, в частности, по поводу важности и направления взаимодействий между различными факторами продукции.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOUCHET R. J., 1963. Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. *L'eau et la Production végétale*, I. N. R. A., Paris, 151-232.

BOUCHET R. J., 1964. *Wasser und Pflanzenprodulation in Probleme des wasser und warmehaushaltes von kulturpflanzen.* Karl Marx Universität, Leipzig.

BOUCHET R. J., CHARTIER Ph., 1966. Light, water and dry matter production of a plant community. Sommaire. *Bull. amer. meteorol. Soc.*, **47**. 471-462.

BOUCHET R. J., PARCEVAUX S. de, ARNOUX J., 1963. Amélioration du rendement des végétaux par abaissement de l'évapotranspiration potentielle. *L'eau et la Production végétale*, I. N. R. A., 233-241.

BUDYKO M. I., 1964. Étude théorique des effets des facteurs du climat sur la photosynthèse (en russe). *Dokl. Akad. Nauk. S. S. S. R.* **158**, 2.

BUDYKO M. I., 1966. Solar radiation and the use of it by plants. *C. R. Ier Symp. internation. sur les méthodes en agroclimatologie*, Reading. (sous presse).

CHARTIER Ph., 1966 *a*. Etude du microclimat lumineux dans la végétation. *Ann. agron.* **17**, (5), 571-602.

CHARTIER Ph., 1966 *b*. Étude théorique de la photosynthèse globale de la feuille. *C. R. Acad. Sci.* (Paris), **263** (1), série D, 44-46.

CHARTIER Ph., 1966 *c*. Étude théorique de l'assimilation brute de la feuille. *Ann. Physiol. vég.*, **8** (3), 167-195.

CHARTIER Ph., HALLAIRE M., 1967. Photosynthèse de la feuille et du couvert végétal : influence particulière de l'alimentation hydrique. *C. R. internation. Soil Water Symp.*, Prague, 51-72.

DAMAGNEZ J., 1966. Évapotranspiration potentielle, évapotranspiration réelle et rendement des cultures en zone aride méditerranéenne. *C. R. Ier Symp. internation. sur les méthodes en agroclimatologie*, Reading (sous presse).

MONSI M., SAEKI T., 1953. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedentung für die Stoffproduktion. *Jap. Bot.*, **14**, 22-52.

MONTEITH J. L., 1963. Gas exchange in plant communities. In EVANS L. T. *Environmental of Plant Growth.* Academic Press, New York et Londres.

RABINOVITCH E. J., 1951. *Photosynthesis and related processes. Kinetics of Photosynthesis.* Interscience Publishers, New York.

ROBELIN M., 1961. Éléments sur la rentabilité de l'irrigation. *Ann. agron.* **12** (1), 65-73.

STERN W. R., DONALD C. M., 1962 *a*. Light relationships in grass clover swards. *Austral. J. agric. Res.*, **13**, 599-614.

STERN W. R., DONALD C. M., 1962 *b* The influence of leaf area and radiation on the growth of clover in swards. *Austral. J. agric. Res.*, **13**, 615-623.

VERHAGEN A. M., WILSON J. H., BRITTEN E. S., 1963. Plant production in relation to foliage illumination. *Ann. Bot.*, **27**, 627-640.

VILLÈLE O. de, 1965. Cinq années d'expérimentation sur les besoins en eau des cultures. *Documents techniques de l'I. N. R. A. T., Ariana, Tunisie*, **11**, 54 p.

WATSON D. J., WITTS K. J., 1959. The net assimilation rates of wild and cultivated beets. *Ann. Bot.* **23** (91), 431-439.

de WIT, 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Agric. Res. Rep.*, n° 663, *Wageningen*, 57 p.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction,* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires que pour le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats,* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de : et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.
La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.
Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.
Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.
Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.
Il est rappelé que le format utile des Annales est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.
Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise), France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la Publication: M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 7-1967.

Dépôt légal: 3e trimestre 1967. N° d'impression: 696.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 18 1967 NUMÉRO 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

NOTICE NÉCROLOGIQUE

Charles GRANDVIGNE (1883-1967)

Nous avons appris le décès de M. Charles GRANDVIGNE, survenu le 15 mai 1967 dans sa 84e année.

M. GRANDVIGNE, Ingénieur agronome, Licencié ès sciences, Directeur honoraire de Recherches à l'I. N. R. A., fut nommé le 1er janvier 1914 Directeur de la Station d'Agronomie, alors organisme départemental, après avoir assuré la direction du laboratoire homologue du Pas-de-Calais. Il faisait valoir ses droits à la retraite le 1er janvier 1948.

L'œuvre de M. GRANDVIGNE est vaste. Elle concerne des études de terrains, plus particulièrement dans la région de Dijon, Châtillon-sur-Seine et le Pays de Gex, des travaux d'expérimentation sur les engrais, des recherches sur la silice colloïdale et surtout sur les laits et les beurres dans le cadre de la production fourragère et sous l'angle des falsifications, son laboratoire étant agréé par le Service de la Répression des Fraudes.

Il était en outre Président d'honneur de la Section régionale de l'Association française pour l'Étude du Sol.

Chevalier de la Légion d'Honneur, Officier du Mérite agricole, Officier d'Académie, médaille d'honneur d'argent de l'Éducation physique, M. GRANDVIGNE alliait à une compétence professionnelle totale, une modestie sans égale et un dévouement qui s'exerçait dans des activités extra-professionnelles où jusqu'à ses derniers jours il s'est dépensé sans compter.

Tous ceux qui l'ont connu ont apprécié sa bonté, sa valeur et regrettent profondément sa disparition.

Mme MÉRIAUX.

Ann. agron., 1967, **18** (4), 339-360.

ÉTUDE DES CONCRÉTIONS ET MATÉRIAUX FERRUGINEUX EN SOL ROUGE SOUS CLIMAT TEMPÉRÉ

J. CHRÉTIEN

avec la collaboration technique de Monique JACQUIN

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, 21 - Dijon

SOMMAIRE

La présence exceptionnelle d'un sol rouge sous climat tempéré nous a conduit à étudier la nature et la répartition des matériaux ferrugineux qu'il renferme.

Ce sont surtout les concrétions ferrugineuses qui font l'objet de ce mémoire : importance, répartition, morphologie, structure, nature minéralogique et chimique des oxydes de fer.

Une étude magnétique de ces concrétions à l'aide d'un électro-aimant de minéralogie nous conduit à envisager leurs propriétés magnétiques en rapport avec le taux de matière organique du sol.

INTRODUCTION

Les concrétions ferrugineuses ont fait l'objet de nombreuses études envisagées sous des angles différents : distribution, taille et richesse en oxyde de fer et de manganèse (DROSDOFF et NIKIFOROFF, 1940), composition chimique (GEREI, 1958), genèse (SCHROEDER et SCHWERTMANN, 1955).

Tous ces travaux ont été réalisés sur des concrétions peu riches en fer dans des sols de climat tempéré (podzol, sols à gley ou pseudogley).

Dans le présent mémoire, nous avons entrepris l'étude des concrétions sur un sol ferrugineux rouge violacé, tout à fait exceptionnel dans nos régions.

Après avoir précisé leur répartition dans les fractions sableuses, et décrit leurs caractéristiques morphologiques et structurales, nous avons déterminé leur richesse en fer et la nature des oxydes de fer présents. Enfin, nous avons été conduits à considérer les propriétés magnétiques de ces concrétions en relation avec la matière organique du sol à la suite des travaux de HÉNIN et LE BORGNE (1954) sur les propriétés magnétiques des sols.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

I — *Les sols*

Ces sols rouges s'étendent sur quelques centaines d'hectares aux environs de Thoste, en bordure nord-est du Morvan. Ils reposent sur les assises de l'Hettangien dont le niveau inférieur ou « lumachelle » (1) de Bourgogne se présente sous trois faciès :

un de type normal surtout calcaire ;
la lumachelle ferrugineuse ;
la lumachelle silicifiée.

Les fortes teneurs en fer de ces sols s'expliquent par la présence de la lumachelle ferrugineuse exploitée au siècle dernier, mais les sols rouges ne reposent jamais directement sur le minerai de fer.

Trois profils ont été observés et étudiés. Ils se rattachent à deux types de sols :

1. *L'un peu profond repose sur la lumachelle silicifiée.*

Profil Thoste n° 2 : Quarré-les-Tombes (IGN 1/50 000). Coordonnées Lambert 742,5-273,3.

Carrière dans une friche située sur le plateau.

Description :

A_{11} : 0-25 cm : rouge 2,5 YR 4/4 (couleur Munsell sur terre sèche), structure grenue et texture limonoargileuse. Abondant chevelu racinaire. Quelques cailloux de lumachelle silicifiée.

A_{12} : 25-50 cm : brun rouge 5 YR 4/4, structure polyédrique fragile, même texture que dans l'horizon précédent. Peu de racines. Très nombreux cailloux et blocs avec de la terre interstitielle. Le profil est entièrement acide.

En-dessous de 50 cm : roche compacte fissurée constituée par la lumachelle silicifiée.

2. *L'autre profond* se développe sur un limon d'apport à environ 200 m du premier.

Profil Thoste n° 4 : Quarré-les-Tombes (IGN 1/50 000), coordonnées Lambert 742,8-273,4.

Prairie temporaire sur le plateau.

Description :

A : 0-30 cm : rouge 2,5 YR 4/4, structure grumeleuse fine, et texture limoneuse. Présence de quelques gros cailloux silicifiés et quelques petites concrétions roulées de la taille du millimètre. Excellente pénétration des racines.

B : 30-40 cm : rouge foncé 2,5 YR 3/4, même structure que précédemment, mais texture limono-argileuse. Grosses concrétions ferromanganiques non consolidées. Zone d'accumulation du fer non durcie, ni compacte et assurant un bon drainage.

B/C : 40-60 cm : jaune rouge 7,5 YR 6/4, avec des taches jaunes 10 YR 7/6. Quelques concrétions.

C : 60-120 cm : brun jaune-clair 10 YR 6/4, structure polyédrique fine et fragile et texture limoneuse. Très peu de concrétions. Le profil est entièrement acide.

Le profil Courcelles n° 2 est très semblable à ce dernier.

Les caractéristiques physico-chimiques de ces trois profils figurent au tableau 1.

(1) Une lumachelle est un calcaire constitué presque uniquement de débris de coquilles de lamellibranches Elle peut avoir subi des imprégnations par des substances colloïdales, dans le cas présent, fer ou silice.

TABLEAU I

Caractéristiques physico-chimiques

	Profondeur (cm)	Granulométrie						pH	N ‰	C ‰	M. O. % (C x 1,75)	Fe_2O_3 p. 100	
		< 2 µ	2-20 µ	20-50 µ	50-200 µ	200 µ-1 mm	1-2 mm					Total	Libre (DEB)
Thoste n° 2													
21	0- 20	17,2	34,9	20,9	5,3	12,8	8,9	5,4	2,30	22,19	3,90	10,1	9,7
22	30- 50	17,0	42,2	17,2	3,3	10,5	9,8	5,3	1,55	13,36	2,35	7,6	7,1
23	roche											3,6	3,3
Thoste n° 4													
41	0- 30	17,9	36,3	21,5	8,6	10,8	4,9	5,7	1,35	12,05	2,12	19,0	14,6
42	30- 40	29,8	24,1	14,3	10,3	18,8	2,7	5,3	0,90	5,49	0,96	36,3	28,4
43	60-100	15,4	45,2	27,0	2,6	8,7	1,1	6	0,45	1,31	0,23	6,4	4,4
Courcelles n° 2													
21	0- 20	16,5	32,7	22,2	9,8	14,7	4,1	5,2	1,60	12,41	2,18		
22	30- 50	28,4	24,8	20,4	8,9	13,4	4,1	5,3	1,10	6,08	1,07		
23	80-100	26,0	24,4	15,8	8,9	17,1	7,8	6,1					

II — *Les méthodes employées*

a) *Analyse granulométrique.* — Les différentes fractions granulométriques ont été séparées selon la méthode internationale, l'ammoniaque N étant utilisé comme dispersant. Afin d'obtenir des concrétions ferrugineuses de taille plus homogène, nous avons retenu trois fractions sableuses 50-200 μ, 200 μ-1 mm et 1-2 mm.

En raison de l'abondance du fer, la séparation de la fraction inférieure à 2 μ s'est avérée difficile et elle a nécessité un nombre important de siphonnages (au moins 5).

b) *Comptage statistique sous la loupe binoculaire.* — Ce comptage a eu pour but d'évaluer dans les trois fractions sableuses les proportions des concrétions ferrugineuses par rapport aux autres minéraux. L'individualisation des concrétions étant très facile sous la loupe, cette méthode s'est montrée la seule valable pour les dénombrer.

c) *Analyse minéralogique sommaire* (méthode de TAMM et LEENHEER modifiée par DUCHAUFOUR, 1956).—Le but de cette méthode, essentiellement densimétrique et pratiquée sur les fractions sableuses non calcaires est de séparer les minéraux en six groupes : micas, quartz, feldspaths potassiques et sodiques, feldspaths plagioclases calciques, minéraux lourds et oxydes de fer.

Elle consiste à immerger successivement les sables dans des liqueurs de densité 2,68 (bromoforme + benzène) et 2,9 (bromoforme) pour obtenir trois fractions : légère, moyenne et lourde, à l'intérieur desquelles on peut identifier les six groupes de minéraux précédents.

d) *Triage magnétique des concrétions.* — Nous avons constaté qu'un certain nombre de concrétions étaient attirées et retenues par un petit aimant en fer à cheval, tandis que d'autres étaient seulement déplacées et la plupart insensibles au champ magnétique. Cette constatation nous a conduit à penser qu'une étude magnétique de ces concrétions pouvait présenter quelque intérêt.

L'appareil utilisé est l'électro-aimant de minéralogie Beaudoin, type A-20 pour triage magnétique. Son principe consiste à créer un champ d'enrichissement croissant fonction de l'intensité du courant, dans l'entrefer à écartement variable.

Les particules ou concrétions attirées par un certain champ magnétique restent collées sur le fer supérieur ; la rupture du courant permet de les récupérer et de les compter.

Les courbes d'étalonnage de l'appareil sont représentées à la figure 1.

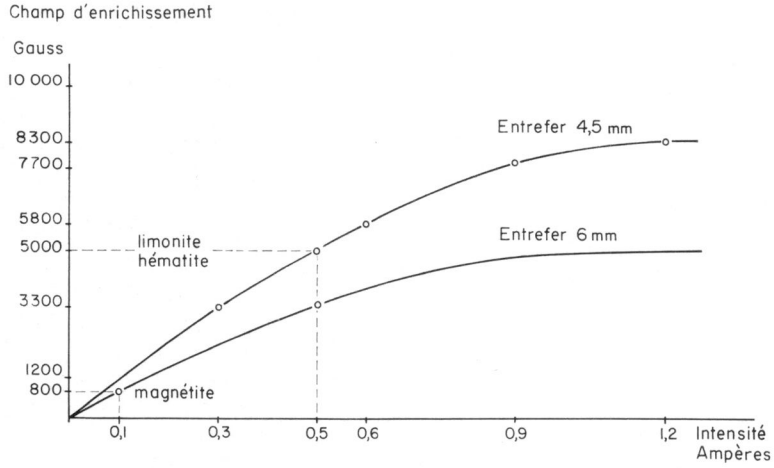


FIG. 1. — *Courbes d'étalonnage de l'électro-aimant de minéralogie*

Nous avons testé l'appareil et vérifié les données du constructeur, à l'aide de quelques minéraux ferrugineux courants :

— La magnétite Fe_3O_4, oxyde magnétique, est attirée par un champ d'enrichissement de 800 gauss environ qui représente approximativement le champ d'un petit aimant en fer à cheval.

— La limonite Fe_2O_3, nH_2O hydrate ferrique non magnétique et l'hématite α Fe_2O_3 oxyde non magnétique sont attirées toutes deux par un champ voisin de 5 000 gauss ; il est donc impossible de faire un tri sélectif dans un mélange.

Cet appareil qui peut créer des champs d'enrichissement allant jusqu'à 15 000 gauss est susceptible d'attirer des minéraux considérés comme non magnétiques, tels que la limonite, l'hématite, la pyrite ou le wolfram.

Il est évident qu'il ne permet pas à lui seul, d'identifier des minéraux mais seulement de réaliser un triage en fonction de leurs propriétés magnétiques.

e) *Diffraction des rayons X.* — Cette étude a été réalisée au Laboratoire des Sols du Centre national de Recherches agronomiques de Versailles. Elle a porté sur des concrétions triées par l'électro-aimant de minéralogie et sur quelques échantillons d'argile.

Notre but était d'identifier les différents oxydes de fer et en particulier, l'oxyde de fer magnétique responsable des propriétés magnétiques des concrétions.

f) *Analyses chimiques.* — Les déterminations de Fe total et de Fe libre ont été effectuées sur des concrétions et diverses fractions granulométriques.

Le fer total est dosé par colorimétrie après attaque sulfo-fluorhydrique et le fer libre selon la technique de DEB après quatre extractions à l'aide de l'hydrosulfite de Na.

L'extraction et le dosage du fer sur les concrétions ont eu lieu après broyage de celles-ci au mortier.

RÉSULTATS

Les résultats obtenus à la suite des différentes manipulations effectuées peuvent être regroupés selon trois rubriques :

— Détermination minéralogique sommaire des sables dont le but essentiel est d'évaluer les proportions de concrétions ferrugineuses par rapport aux autres minéraux.

— Étude approfondie : morphologique, chimique, magnétique et minéralogique des concrétions.

— Étude chimique globale de la répartition du fer dans les diverses fractions granulométriques des horizons d'un profil.

I — *Composition minéralogique des fractions sableuses*

a) *Proportions relatives des concrétions ferrugineuses.*

Les résultats du comptage statistique réalisé sur les trois fractions sableuses (0,05-0,2 mm, 0,2-1 mm et 1-2 mm) figurent au tableau 2. Il en ressort que :

1. *Les proportions de concrétions ferrugineuses* par rapport aux autres minéraux restent dans l'ensemble approximativement les mêmes, des sables fins aux sables grossiers dans chacun des horizons des profils, ce qui conduit à penser que les concrétions existent dans les diverses catégories de sables et qu'elles s'y trouvent à peu près dans les mêmes proportions.

Toutefois, dans l'horizon Thoste 22, les concrétions sont nettement plus nombreuses dans les sables fins (0,05 mm-0,2 mm) alors qu'à Thoste 43, le pourcentage de concrétions croît régulièrement des sables fins vers les sables grossiers.

2. *D'un profil à l'autre,* les proportions de concrétions par rapport aux autres minéraux diffèrent beaucoup.

Au profil Thoste n° 2, superficiel et situé dans la zone silicifiée, les concrétions sont moins nombreuses que les autres minéraux tandis qu'au profil Thoste n° 4 et surtout Courcelles n° 2, sur sols profonds limoneux, elles forment plus des 3/4 des fractions sableuses.

TABLEAU 2

Proportions des concrétions ferrugineuses dans les fractions sableuses

	Sables 0,05-0,2 mm				Sables 0,2-1 mm				Sables 1-2 mm			
	Concrétions ferrugineuses		Autres minéraux		Concrétions ferrugineuses		Autres minéraux		Concrétions ferrugineuses		Autres minéraux	
	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100
Thoste n° 2												
21	64	40	97	60	16	32	34	68	35	41	50	59
22	42	38	68	62	18	22	62	78	35	25	105	75
Thoste n° 4												
41	102	81	24	19	93	79	25	21	120	76	37	24
42	98	94	6	6	76	90	8	10	97	90	11	10
43	47	50	47	50	57	70	25	30	106	88	14	12
Courcelles n° 2												
21	60	79	16	21	70	85	12	15	143	86	24	14
22	116	88	15	12	120	85	21	15	106	87	16	13
23	79	85	14	15	112	94	7	6	113	91	11	9

3. A l'intérieur d'un même profil, les proportions peuvent varier, en particulier, à Thoste 42 où, dans l'horizon d'accumulation ferrique elles atteignent 9/10 des sables.

b) *Nature et proportion des minéraux des sables.*

L'application de la méthode d'analyse minéralogique sommaire de DUCHAUFOUR à la fraction sableuse 1-2 mm mérite ici une attention particulière.

Les résultats sont consignés au tableau 3.

Trois fractions : légère, moyenne et lourde ont été isolées, mais l'interprétation minéralogique à l'intérieur de ces fractions a été rendue très délicate par la présence de lumachelle silicifiée et de concrétions ferrugineuses dont les densités excessivement variables les font classer indifféremment dans l'une ou l'autre des fractions.

En principe, la fraction légère devrait contenir du quartz et des feldspaths potassiques et sodiques. Le quartz a été facilement identifié et rencontré uniquement dans cette fraction légère. En outre, les autres minéraux présents étaient quelques feldspaths potassiques et sodiques, un peu de calcédoine, mais surtout de très nombreux fragments de lumachelle silicifiée et des concrétions ferrugineuses.

La fraction moyenne, celle des plagioclases calciques n'en contient pas, car ces minéraux très rapidement altérés n'existent pas dans ces sables. En réalité, cette fraction, en plus des concrétions ferrugineuses, renferme essentiellement des fragments de lumachelle silicifiée.

La fraction lourde, celle des minéraux lourds, comprend des concrétions ferrugineuses et un peu de barytine.

En résumé, il ressort que les concrétions ferrugineuses apparaissent dans les trois fractions densimétriques. Elles ne peuvent donc pas, dans le cas présent, être isolées dans la fraction lourde comme l'indique P. DUCHAUFOUR. Ceci s'explique facilement si l'on considère que ces concrétions sont formées d'un mélange en toutes proportions d'oxydes de fer, d'argiles, de quartz donnant ainsi des densités excessivement variables.

C'est néanmoins dans la fraction lourde, celle des oxydes de fer que l'on en rencontre les plus grandes proportions.

Les roches silicifiées et le quartz sont surtout abondants au profil Thoste n° 2 formé sur un substrat de lumachelle silicifiée.

II — *Étude des concrétions ferrugineuses*

a) *Description.*

L'examen morphoscopique a été effectué à la loupe binoculaire sur les concrétions de taille 1-2 mm. Les diverses concrétions rencontrées dans les échantillons étudiés offrent une grande diversité d'aspect, de forme, de couleur et de structure.

Toutefois, d'un profil à l'autre ou même d'un horizon à l'autre à l'intérieur d'un même profil, elles présentent des caractères particuliers que nous examinerons successivement à partir des différents échantillons.

Profil Thoste n° 2.

Dans ce profil, les concrétions sont peu nombreuses.

En l'absence d'un horizon d'accumulation ferrique, elles présentent le même type dans les deux horizons T_{21} et T_{22}.

TABLEAU 3

Composition minéralogique des sables grossiers (1-2 mm)
(Méthode DUCHAUFOUR et triage à la loupe binoculaire)

	Fractions légères $d < 2{,}68$						Fractions moyennes $2{,}68 < d < 2{,}90$				Fractions lourdes $d > 2{,}90$			
	Quartz		Lumachelle silicifiée		Concrétions ferrugineuses		Lumachelle silicifiée		Concrétions ferrugineuses		Barytine		Concrétions ferrugineuses	
	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100	Nombre	P. 100
Thoste n° 2														
21	5	9	39	66	15	25	16	29	40	71	3	5	56	95
22	10	16	45	70	9	14	3	7	42	93	0	0	49	100
Thoste n° 4														
41	9	15	20	33	32	52	5	10	44	90	3	5	52	95
42	0	0	7	18	32	82	2	4	48	96	1	2	60	98
43	10	18	3	5	43	77	0	0	22	100	0	0	45	100
Courcelles n° 2														
21	10	17	5	8	45	75	1	1	80	100	0	0	65	100
22	9	18	3	6	38	76	0	0	50	100	1	1	80	100
23	5	10	8	17	36	73	0	0	82	100	0	0	72	100

Pas de plagioclase.
Quelques feldspaths K et Na < 1 p. 100.
Quelques micas < 1 p. 100.

La plupart sont polyédriques et anguleuses, de couleur variant du beige ocre au brun. Elles possèdent une structure très hétérogène présentant souvent un mélange d'oxydes de fer plus ou moins bien cristallisés et de grains minuscules, moyens ou grossiers de quartz et de lumachelle silicifiée.

Quelques-unes sont sphériques ou lenticulaires. Leur structure est régulière, non concentrique ; elles sont formées essentiellement d'oxydes de fer et de manganèse cristallisés et ne contiennent aucune inclusion de quartz ou de lumachelle silicifiée.

Profil Thoste n° 4.

Contrairement au profil précédent, les concrétions sont ici très différentes d'un horizon à l'autre.

Dans l'horizon de surface T_{41}, leur forme le plus souvent polyédrique, leur couleur toujours foncée brun-noir à noir, l'absence d'inclusions leur donne l'aspect de fragments de minerai de fer.

Comme à Thoste n° 2, on trouve également quelques concrétions rondes ou lenticulaires.

A Thoste 42, dans l'horizon d'accumulation ferrique, et uniquement là, un seul type de concrétions existe. Ce sont plutôt des fragments de grosses concrétions non consolidées, ayant la forme de languettes scoriacées et poreuses et présentant souvent une portion de surface lisse. Elles sont beaucoup plus cassantes et friables que les autres et leur couleur est uniformément brun violacé ; aucune tache noire n'apparaît.

— A Thoste 43, enfin, on ne retrouve plus de concrétions du type précédent mais d'autres, semblables à celles de l'horizon de surface avec toutefois des angles plus émoussés.

Profil Courcelles n° 2.

A l'intérieur de ce profil, les concrétions sont également bien différenciées en fonction des horizons.

— Dans l'horizon superficiel C_{21}, elles ont une forme régulière sphérique, oblongue ou légèrement anguleuse mais à angles très arrondis et leur couleur est généralement brun-noir.

— En C_{22}, deux types sont représentés à peu près dans les mêmes proportions :

— des concrétions régulières du type précédent ;

— des fragments de grosses concrétions non consolidées comme en T_{42}.

En résumé, et tenant compte de l'infinie variété du point de vue morphologie, couleur, et structure des concrétions rencontrées, il paraît logique de les regrouper suivant 4 types :

1. Des concrétions irrégulières, anguleuses, de couleur variée allant du beige ocre au brun foncé et surtout de structure très hétérogène avec un grand nombre d'inclusions de quartz et de lumachelle silicifiée.

On rencontre ce type uniquement au profil Thoste n° 2.

2. Des concrétions polyédriques à angles émoussés, ayant l'aspect de fragments de minerai de fer, de couleur foncée, brun à brun noir et de structure plus homogène ne contenant pas d'inclusions grossières.

On les trouve dans les profils Thoste nº 4 et Courcelles nº 2, mais surtout dans l'horizon Thoste 41.

3. Des concrétions de forme régulière, pseudo-rondes ou lenticulaires, très foncées, sans inclusions, mais de structure non concentrique qui semblent se localiser surtout au profil Courcelles nº 2.

4. Enfin, des fragments de grosses concrétions non consolidées, de couleur uniformément brun violacé, en forme de languettes scoriacées et poreuses que l'on rencontre uniquement dans les horizons d'accumulation ferrique.

b) *Propriétés magnétiques.*

Cette étude qui a porté sur les concrétions préalablement isolées de la fraction sableuse 1-2 mm a été effectuée sur une centaine de concrétions par échantillon dans les divers horizons des profils précédemment décrits.

Les résultats figurent au tableau 4 où sont représentés les nombres et pourcentages cumulés des concrétions retenues dans l'entrefer de l'électro-aimant en fonction d'une intensité croissante.

Sur la figure 2, nous avons représenté les courbes cumulatives de séparation magnétique des concrétions en fonction du champ magnétique d'enrichissement

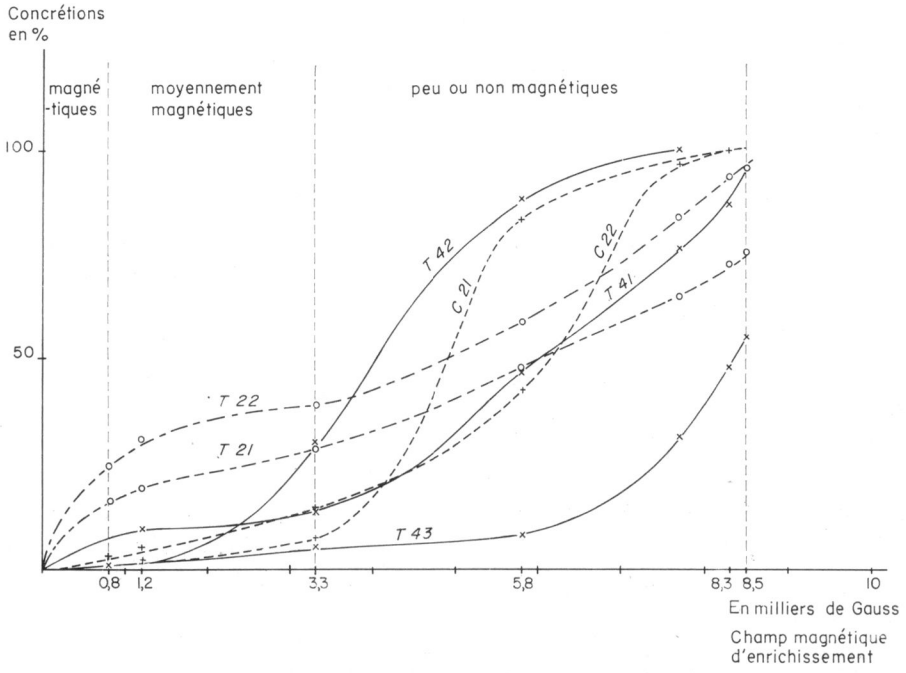


FIG. 2. — *Courbes de séparation magnétique des concrétions* (1-2 mm)

La manipulation s'est réalisée en deux temps :

— Avec un entrefer de 6 mm et une intensité faible de 0,1 ampère, nous avons séparé les concrétions dites « magnétiques » attirées en même nombre par un petit aimant en fer à cheval.

TABLEAU 4

Séparation magnétique des concrétions ferrugineuses (fraction 1-2 mm)
(nombre et pourcentages cumulés des concrétions en fonction d'une intensité croissante)

	Entrefer 6 mm		Entrefer 4,5 mm												Total	
	Intensité (en ampères)		Intensité en ampères													
	0,1 A		0,1 A		0,3 A		0,6 A		0,9 A		1,2 A		1,5 A		Reste			
	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%
Thoste n° 2																		
21	22	16	5	19,7	12	28,5	27	48,2	23	65	10	72,3	5	75,9	33	24,1	137	100
22	28	24,1	8	31	9	38,8	23	58,6	30	84,5	11	94	2	95,7	5	4,3	116	100
Thoste n° 4																		
41	7	7,6	2	9,8	3	13	32	47,8	26	76,1	10	87	8	95,7	4	4,3	92	100
42	0	0	1	0,7	40	29,9	81	89	15	100	0	100	0	100	0	0	137	100
43	0	0	1	1	5	6	2	8	23	31	17	48	7	55	45	45	100	100
Courcelles n° 2																		
21	2	1,2	0	1,2	10	7,1	129	83,4	22	96,4	6	100	0	100	0	0	169	100
22	4	2,9	3	5,1	12	13,9	39	42,6	73	96,3	5	100	0	100	0	0	136	100
Concrétions ..	magnétiques		moyennement magnétiques				peu et non magnétiques											

— Puis avec un entrefer de 4,5 mm, la variation croissante d'intensité nous a permis d'isoler des concrétions de moins en moins magnétiques jusqu'à un champ d'enrichissement maximum de 8 500 gauss. Nous avons introduit la notion un peu arbitraire de concrétions « moyennement magnétiques » pour celles qui se séparent sous l'influence d'un champ compris entre 800 et 3 300 gauss.

En fait, ces concrétions contiennent un certain pourcentage d'oxydes de fer magnétiques, puisqu'elles sont sensibles à un champ d'enrichissement nettement moins élevé que celui nécessaire à la séparation des oxydes et hydroxydes de fer non magnétiques des sols, limonite et hématite (5 000 gauss). Nous verrons plus loin l'intérêt de cette notion.

Cette étude nous révèle que :

Seul le profil Thoste n° 2 contient un pourcentage important de concrétions magnétiques.

En ce qui concerne les autres concrétions :

— Les deux horizons de Thoste n° 2 présentent des courbes cumulatives de même allure, l'horizon profond étant toujours le mieux pourvu en concrétions les plus magnétiques.

Le profil Thoste n° 4 est très diversifié :

— Il présente un horizon supérieur 41 du type précédent avec toutefois moins de concrétions magnétiques.

— Un horizon d'accumulation 42 où toutes les concrétions sont un peu magnétiques.

— Un horizon inférieur 43 où la plupart des concrétions ne sont pas magnétiques (reste important).

Enfin, le profil Courcelles n° 2 comprend essentiellement des concrétions peu ou pas magnétiques.

Nous tenterons, lors de la discussion d'expliquer ces divergences dans les propriétés magnétiques des concrétions d'un profil à l'autre et à l'intérieur d'un même profil en examinant en particulier quelles peuvent être les incidences de la matière organique du sol, déjà révélées par des travaux de HÉNIN et LE BORGNE (1954).

c) *Teneur en fer.*

Les analyses effectuées sur quelques échantillons ont donné les résultats suivants exprimés en Fe_2O_3 :

	Fe total p. 100	Fe libre p. 100 (DEB)	Rapport Fe libre/Fe total
Concrétions non magnétiques :			
Courcelles 21	72,23	56,14	77,7
Thoste 21	42,06	32,57	77,4
Concrétions magnétiques :			
Thoste 21	49,14		

Les teneurs en fer sont toujours très importantes.

Par contre, ces teneurs sont très variables d'un sol à l'autre et d'un horizon à l'autre.

Les concrétions des horizons d'accumulation sont très riches en fer total : par exemple, les sables grossiers (0,2-1 mm) de Thoste 42 contiennent 65,83 p. 100 de Fe_2O_3 pour 90 p. 100 de concrétions. Le dosage du fer libre sur les concrétions broyées indique un taux important. Il semble dans le cas présent que 1/4 seulement du fer se trouve à l'état bloqué.

Les résultats précédents paraissent indiquer également qu'*il n'existe pas de relation entre la teneur en fer et les propriétés magnétiques des concrétions dans les limites présentes, 40 à 75 p. 100 de* Fe_2O_3.

d) *Nature minéralogique des oxydes de fer.*

L'analyse aux rayons X qui a porté sur 5 échantillons de concrétions a mis en évidence la mauvaise cristallisation des minéraux et la difficulté d'interprétation des diagrammes.

Toutefois, tous les échantillons contiennent du quartz. Deux oxydes et un hydroxyde de fer ont pu être déterminés : l'hématite α Fe_2O_3 toujours présente, la maghémite γ Fe_2O_3 magnétique et la goethite α FeOOH que l'on trouve dans certains échantillons.

De façon plus précise et en relation avec les propriétés magnétiques des concrétions, les résultats ont été les suivants :

Thoste 21 :

— concrétions magnétiques : hématite, un peu de maghémite ;

— concrétions moyennement magnétiques : hématite, un peu de maghémite ;

— concrétions non magnétiques : hématite, probablement un peu de goethite.

Thoste 42 :

— concrétions non magnétiques : hématite, goethite.

Courcelles 21 :

— concrétions moyennement magnétiques : hématite, un peu de maghémite.

Outre la présence d'hématite qui donne, bien sûr la teinte caractéristique rouge de ces sols, cette analyse indique clairement que l'oxyde de fer magnétique présent uniquement dans les concrétions magnétiques et moyennement magnétiques est la maghémite.

En plus de ces trois déterminations effectuées sur les concrétions, deux échantillons de la fraction inférieure à 2 μ des horizons Thoste 21 et Thoste 42 ont également été soumis à l'analyse aux rayons X. La présence d'hématite y est certaine mais pour le reste il est difficile de dire avec précision ce à quoi nous avons à faire,

étant donné l'absence de raie. Toutefois, d'après les courbes gravimétriques, il semble que l'on soit en présence de substances amorphes à base de silice associées à quelques hydrates ferriques indépendants.

III — *Répartition du fer dans les profils*

Les teneurs globales du sol en fer total, figurent au tableau 1 avec les caractéristiques physico-chimiques générales des horizons. Ces teneurs (exprimées en Fe_2O_3) sont importantes, nettement plus élevées que celles des sols bruns tempérés (SEGALEN, 1964). Voisines de 10 p. 100 au profil Thoste n° 2, elles atteignent 36 p. 100 dans l'horizon B de Thoste n° 4. La pauvreté en fer de l'horizon Thoste 43, indique nettement que ce sol ne s'est pas formé sur un matériau ferrugineux en place.

Le profil Thoste n° 4, essentiellement, a fait l'objet d'un dosage systématique du fer total et du fer libre dans toutes les fractions granulométriques.

Les résultats qui expriment les teneurs en fer total et libre en p. 100 du total du sol (teneur en fer x valeur de la fraction granulométrique) sont consignés au tableau 5. Ils font ressortir un certain nombre de points particuliers :

TABLEAU 5

Fe_2O_3 total et libre (DEB) *en p. 100 du total du sol*

Échantillons	Fraction	Argile < 2 µ	Limon fin 2-20 µ	L. grossier 20-50 µ	Sable fin 50 µ-0,2 mm	S. grossier 0,2-1 mm	S. grossier 1-2 mm
Thoste 41	Fe total	3,89	2,90	2,25	2,80	3,90	1,76
	Fe libre	3,76	2,49	2,03	2,45	3,79	
Thoste 42	Fe total	5,63	4,23	3,86	6,25	12,38	1,78
	Fe libre	5,13	3,96	3,06	4,06	3,67	
Thoste 43	Fe total	1,58	1,40	0,85	0,20	1,02	0,13
	Fe libre	1,06	0,75	0,47	0,18	0,88	
Thoste 21	Fe total	3,33	1,92	1,05	0,92	1,85	1,28
	Fe libre	3,11	1,59	0,95	0,91	1,76	

— Environ 30 p. 100 du fer total se trouve à l'état de concrétions de la taille des sables grossiers (0,2-2 mm) dans les horizons de surface des deux profils et 42 p. 100 dans l'horizon d'accumulation ferrique Thoste 42.

Ces chiffres représentent les teneurs en fer de la fraction sableuse totale. Comme dans cette fraction, seules les concrétions contiennent du fer, il est logique d'assimiler la teneur en fer des concrétions avec la teneur en fer des fractions sableuses totales.

— La fraction inférieure à 2 µ renferme selon les horizons de 16 à 32 p. 100 de fer total qui se trouve vraisemblablement à l'état colloïdal lié à la matière organique et à l'argile et peut-être partiellement sous forme de silicates ferrugineux.

— Le fer libre dosé par la méthode DEB représente dans la plupart des cas une fraction importante du fer total. Examinons les variations du rapport fer libre/fer total dans les diverses fractions granulométriques du profil Thoste n° 4.

	Thoste 41	Thoste 42	Thoste 43
Argile	96,7	91,1	67,1
Limon fin	85,7	93,6	53,6
Limon grossier	90,1	79,2	55,3
Sable fin 0,05-0,2 mm	87,5	64,9	90,0
Sable grossier 0,2-1 mm	97,4	29,6	86,3

— Le fer libre représente dans la plupart des cas 80 à 95 p. 100 du fer total.

— L'influence de la taille des particules est nulle dans le cas de l'horizon de surface. Par contre, elle est très marquée dans l'horizon B où le rapport fer libre/fer total décroît régulièrement de l'argile aux sables grossiers.

Dans les concrétions de cet horizon d'accumulation, et uniquement là, 70 p. 100 du fer se trouvent bloqués.

Ce blocage important du fer dans les concrétions de l'horizon B ressort nettement si l'on compare les valeurs du rapport fer libre/fer total dans les deux fractions sableuses des trois horizons.

DISCUSSION

I — *Le fer dans les profils*

a) *Teneur et répartition.*

Les fortes teneurs en fer total de ces sols, nettement plus importantes que celles des sols bruns tempérés sont incontestablement dues à la présence d'une lumachelle ferrugineuse. Toutefois, elles ne sont pas aussi élevées que celles obtenues par STORRIER et MUIR (1962) dans un sol brun ferrugineux véritablement développé sur le minerai de fer et comprises, de A vers C, entre 45 et 70 p. 100 (en Fe_2O_3).

Ici, au contraire, les teneurs en fer des horizons profonds sont les plus faibles, ce qui indique que ces sols ne reposent pas directement sur la lumachelle ferrugineuse. Une étude précise de la stratigraphie locale montre clairement qu'ils se situent topographiquement en dessous de l'affleurement de la lumachelle ferrugineuse.

Ils se sont développés sur les produits d'érosion de la lumachelle entraînés par drainage latéral et colluvionnement le long des faibles pentes.

En ce qui concerne la répartition du fer dans les profils, si à Thoste n° 2, on observe une décroissance régulière de la teneur en fer de la surface vers la profondeur, par contre, à Thoste n° 4, l'horizon d'accumulation B fortement marqué indique une migration verticale descendante importante.

b) *Nature des oxydes de fer.*

L'hématite α Fe_2O_3 parfaitement mise en évidence dans tous les échantillons par l'analyse aux rayons X n'est autre que le « Fer oligiste » des couches de lumachelle ferrugineuse. Elle ne semble pas avoir subi de transformations en passant du substrat géologique aux sols.

La goethite résulte vraisemblablement de phénomènes d'hydratation et les produits ferrugineux amorphes reflètent la mauvaise cristallisation de l'ensemble.

La présence de maghémite dans les sols est connue. Elle a été mise en évidence par HÉNIN et LE BORGNE (1954) à la suite de plusieurs études sur les propriétés magnétiques des sols. En mesurant la susceptibilité magnétique dans de nombreux types de sols de Bretagne, et à la suite de certaines expériences de laboratoire, les auteurs ont pu constater que les propriétés magnétiques étaient dues à la présence de maghémite γ Fe_2O_3 localisée essentiellement dans la fraction argileuse (HÉNIN et LE BORGNE, 1953).

Ils ont montré, en outre, qu'à l'intérieur d'un même profil, la valeur de la susceptibilité magnétique est, en général, beaucoup plus élevée dans l'horizon humifère de surface que dans les horizons sous-jacents même si leur teneur en fer est considérable.

Selon les auteurs, c'est la présence de la matière organique jouant le rôle de réducteur qui présiderait vraisemblablement à la précipitation du fer sous forme de γ Fe_2O_3. Plus récemment, les travaux de OADES et TOWNSEND (1963) sont venus confirmer les hypothèses précédentes.

L'étude magnétique des concrétions ferrugineuses que nous avons réalisée doit apporter quelques précisions à ce sujet.

II — *Les concrétions*

a) *Morphologie.*

La morphologie des concrétions polyédriques irrégulières du profil Thoste n° 2 s'explique facilement si l'on considère que celles-ci résultent de la cristallisation des oxydes de fer sur des fragments plus ou moins grossiers de quartz ou de roche silicifiée jouant le rôle de support et particulièrement abondants dans ce sol.

Les concrétions rondes ou régulières du type Courcelles n° 2 se sont élaborées vraisemblablement selon le même processus, mais à partir de noyaux de cristallisation très petits qui n'ont pas entravé la croissance régulière de la concrétion. Des phénomènes d'usure consécutifs à un transport peuvent aussi expliquer la présence d'angles arrondis.

Par contre, les concrétions ayant l'allure de véritables fragments de minerai de fer, résultent vraisemblablement de l'altération et en particulier de la décalcification de la lumachelle ferrugineuse sans remaniement ultérieur important.

Il est probable que ces trois précédents types de concrétions sont de formation ancienne.

Au contraire, dans les horizons d'accumulation ferrique comme à Thoste 42, nous sommes en présence de grosses concrétions de la taille du centimètre ou plus, non consolidées et de structure poreuse, en cours d'élaboration et qui résultent de

l'accumulation du fer issu de l'horizon illuvial de surface. Sous la loupe, nous n'avons observé que des fragments de ces concrétions disloquées lors du prélèvement et de la préparation des échantillons.

Il convient de signaler dans ce chapitre que lors de la séparation magnétique des concrétions, nous n'avons pu faire de distinction morphologique entre les concrétions magnétiques et non magnétiques.

b) *Couleur.*

La couleur des concrétions allant du beige au noir en passant par des intermédiaires ocre, violacé, brun est sans aucun doute en rapport avec la quantité et la nature des oxydes de fer et de manganèse présents. Les languettes violacées des horizons d'accumulation ferrique sont riches en oxyde de fer déshydratés du type hématite tandis que les concrétions brunes très foncées ou même noires renferment vraisemblablement de fortes quantités d'oxyde de manganèse.

Il est probable également que c'est surtout de la goethite, oxyde hydraté de couleur brun-jaune à jaune clair qui se trouve dans les concrétions claires beige ou beige ocre.

Notons que l'hématite gris d'acier en masse cristallisée ne prend une couleur rouge vif qu'en poudre.

Quant à la maghémite, elle est difficile à caractériser de par sa couleur brune, mais à ce propos, nous avons pu observer que les concrétions magnétiques étaient en général brun-rouge, mais rarement beige.

c) *Structure.*

La plupart des concrétions présentent une structure hétérogène, sans allure concentrique, d'aspect granuleux et renferment des plages de différentes couleurs, noires, brunes ou ocres. Cet aspect varié reflète parfaitement la complexité des formes et des états de cristallisation, d'oxydation et d'hydratation des oxydes de fer.

Les structures poreuses et scoriacées des concrétions dans les horizons B ferriques résultent de l'accumulation à l'état microcristallisé ou même en partie amorphe des oxydes de fer sans qu'aucun processus d'induration n'entre en jeu.

Nous n'avons pas observé de concrétions roulées formées d'anneaux concentriques fréquemment décrites par les auteurs. Cette opinion rejoint celle de DROSDOFF et NIKIFOROFF (1940) qui, dans leur étude sur les *Dayton Soils* ont surtout rencontré des concrétions sans anneaux concentriques, enveloppées par un fin revêtement extérieur.

Dans les sols de Thoste, nous avons tout de même remarqué quelques concrétions rondes qui comprenaient un noyau s'individualisant au sectionnement, un manteau plus clair et une fine enveloppe externe.

d) *Teneur en fer.*

Les teneurs en fer des concrétions sont toujours très importantes, beaucoup plus fortes que celles citées par divers auteurs dans des sols de pays tempérés : 17 à 23 p. 100 de Fe total exprimé en Fe_2O_3 dans les concrétions de dernopodzols à gley (DROSDOFF et NIKIFOROFF, 1940) et 13,7 à 22,8 p. 100 dans les concrétions de divers sols de Hongrie (GEREI, 1958) mais ceci est tout à fait normal, compte tenu de la

forte teneur en fer du sol puisque la composition des concrétions dépend dans une large mesure du milieu dans lequel elles se sont formées (SEGALEN, 1964). Par contre, ces teneurs sont du même ordre de grandeur que celles des concrétions dans les sols de la zone intertropicale, sols ferrugineux tropicaux de Madagascar : 52 à 58 p. 100 (en Fe_2O_3) ou sols ferralitiques : 28 à 57 p. 100 (SEGALEN, 1964).

Il est bien évident que la pédogenèse des sols de Thoste n'a jamais eu de caractère intertropical et l'analogie des teneurs en fer est due uniquement à la présence exceptionnelle d'une roche-mère ferrugineuse.

III — *Origine des propriétés magnétiques des concrétions*

Les propriétés magnétiques des concrétions ont déjà été mises en évidence dans des sols latéritiques d'Hawaï par SHERMAN et KANEHIRO (1954).

Les auteurs indiquent que dans les croûtes latéritiques étudiées, les concrétions sont en général magnétiques et peuvent être collectées par l'usage d'un aimant. Approximativement 80 p. 100 de celles-ci sont fortement magnétiques, les autres étant faiblement ou non magnétiques. Ils attribuaient la cause de ces propriétés à la maghémite.

Plus récemment, MATSUSAKA et SHERMAN (1965) ont montré que les minéraux magnétiques présents dans les sols d'Hawaï étaient essentiellement la titanomagnétite et la titanomaghémite, celle-ci résultant vraisemblablement d'une part de l'oxydation de la titanomagnétite primaire présente dans des roches basaltiques et andésitiques, d'autre part de la déshydratation de la lépidocrocite en présence d'ions Ti^{4+}.

Dans les concrétions magnétiques des sols de Thoste, beaucoup moins nombreuses la maghémite a été le seul oxyde de fer magnétique identifié par l'analyse aux rayons X. Tout permet donc de penser que c'est bien γ Fe_2O_3 qui confère aux concrétions leurs propriétés magnétiques. Mais il reste à expliquer l'origine de cet oxyde de fer. Deux hypothèses peuvent être envisagées. Dans la première, la maghémite dériverait directement ou par oxydation de la magnétite de la roche ferrugineuse sans transformation dans les sols. CAILLÈRE et KRAUT (1954) par exemple, ont reconnu la magnétite et la maghémite dans le minerai de fer oolithique de Lorraine.

Cependant, dans ce cas, les concrétions magnétiques devraient exister en proportions voisines dans les trois profils étudiés alors qu'elles sont surtout présentes au profil Thoste n° 2.

La seconde hypothèse attribuerait à la maghémite une origine pédologique.

A la suite des travaux de HÉNIN et LE BORGNE, nous avons tenté de mettre en parallèle les pourcentages cumulés de concrétions magnétiques et « moyennement » magnétiques précédemment définies avec le taux de matière organique dans les différents horizons.

Ces résultats figurent au tableau 6.

Il en ressort que, d'une part, seul le profil sur friche Thoste n° 2 riche en matière organique contient un taux important de concrétions magnétiques et moyennement magnétiques et que d'autre part, ces concrétions sont plus nombreuses dans l'horizon moyen (30-50 cm) que dans l'horizon de surface, que celui-là soit un horizon d'accumulation (Thoste 42) ou non (Thoste 22).

Au contraire, dans l'horizon C inférieur, Thoste 43, le pourcentage de concrétions magnétiques est très faible.

Pour HÉNIN et LE BORGNE, la formation de maghémite ne se produit qu'en présence de matière organique liée à la fraction argileuse et la précipitation du fer en l'absence de matière organique, dans les concrétions et alios par exemple, ne conduit pas à γ Fe_2O_3. Nos constatations, au contraire, semblent indiquer que la maghémite peut également exister dans les concrétions indépendamment ou presque de la teneur en fer comprise ici entre 40 et 75 p. 100, et il n'est pas exclu, à notre avis,

TABLEAU 6

Relations entre taux de matière organique et concrétions magnétiques

	Profondeur (cm)	Concrétions magnétiques (%) (800 gauss)	Concrétions magnétiques + moyennement magnétiques (%) (3 300 gauss)	Matière organique (%) (C x 1,75)
Thoste n° 2				
21	0-20	16	28,5	3,90
22	30-50	24,1	38,8	2,35
Thoste n° 4				
41	0-20	7,6	13	2,12
42	30-40	0	29,9	0,96
43	60-80	0	6	0,23
Courcelles n° 2				
21	0-20	1,2	7,1	2,18
22	30-50	2,9	13,9	1,07

d'envisager sa formation selon l'hypothèse suivante : dans les horizons très humifères de surface la matière organique joue le rôle de réducteur vis-à-vis du fer ferrique, le fer réduit migre vers l'horizon sous-jacent et reprécipite à l'état ferrique dans les concrétions ferrugineuses en partie sous forme de maghémite.

CONCLUSION

Les sols rouges de la région de Thoste présentent des teneurs en fer tout à fait exceptionnelles sous climat tempéré. Ils dérivent d'un véritable minerai de fer, la lumachelle ferrugineuse.

L'étude des concrétions : importance dans les fractions sableuses, morphologie, couleur, structure, nature minéralogique et chimique des oxydes de fer nous permet de dégager leurs caractéristiques essentielles dans les divers horizons des trois profils étudiés.

Quatre types ont été mis en évidence :

Dans le sol superficiel sur lumachelle silicifiée, des concrétions polyédriques, anguleuses, de couleurs variées, hétérogènes et renfermant des inclusions grossières. Leur teneur globale en fer total est forte : 40 à 50 p. 100 de Fe_2O_3.

En sols limoneux profonds :

— Des concrétions pseudo-rondes, régulières et foncées sans inclusions ni structure concentrique.

— Des concrétions anguleuses, de couleur brun-rouge ayant l'aspect d'un minerai de fer.

Ces deux types sont très riches en fer, environ 70 p. 100.

Dans les horizons d'accumulation ferrique, des fragments de grosses concrétions non consolidées en languettes poreuses et violacées également très riches en fer (70 à 75 p. 100).

L'étude magnétique des concrétions, liée à la présence de maghémite nous amène à la suite des travaux de HÉNIN et LE BORGNE relatifs aux propriétés magnétiques des sols, à relier les pourcentages de concrétions magnétiques au taux de matière organique des horizons dans les profils. Il en ressort que le rôle réducteur joué par la matière organique dans la formation de la maghémite réapparaît ici.

Le pourcentage de concrétions magnétiques est lié au taux de matière organique du profil, mais il est toujours moins élevé dans l'horizon de surface que dans l'horizon sous-jacent.

De telles constatations faites sur un sol bien déterminé, riche en fer, pourraient être l'objet d'une recherche plus systématique sur d'autres types de sols à concrétions, hydromorphes et de prairie par exemple.

Reçu pour publication en mars 1967.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier M. les Professeurs de la Chaire de Géologie de la Faculté des Sciences de Dijon d'avoir aimablement mis à notre disposition l'électro-aimant de minéralogie, ainsi que M. PEDRO, Maître de Recherches au Laboratoire des Sols du Centre de Recherches agronomiques de Versailles qui a bien voulu effectuer la détermination minéralogique des oxydes de fer.

SUMMARY

INVESTIGATION, IN TEMPERATE CLIMATE, OF CONCRETIONS AND FERRUGINOUS MATERIALS IN RED SOILS

The investigation on ferruginous concretions, carried out on three typical profiles of red soils, dealt with the following :

i) their extent with respect to other minerals in sand fractions (statistical counts and summary mineralogical analysis) ;
ii) morphology, colour and structure (with the aid of a binocular lens) ;
iii) mineralogical characteristics of iron oxides (X-ray diffraction) ;
iv) magnetic properties ;
v) total- and free-iron contents.

The four following types of concretions were examined :

a) inclusion-containing, irregular concretions high in iron (40 to 50 p. 100 of Fe_2O_3), in topsoils over silicified coquinoid limestone ;

b) nearly-round concretions, and *c*) angular concretions looking like high iron-content ores (70 p. 100) which are found in deep silty soils, and *d*) fragments of large unconsolidated concretions very high in iron (70 to 75 p. 100) in ferric pans.

The iron oxides present are hematite (α Fe_2O_3), which imparts to these soils their typical hue, and maghemite (γ Fe_2O_3) to which is due their magnetic properties.

The magnetic properties of these concretions, were found to be either very marked, medium or absent. The magnetic concretions are associated with the organic-matter content of the soil.

ZUZAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER KONKRETIONEN UND DER EISENHALTIGEN STOFFE IN DEN RÖTLICHEN BÖDEN UNTER GEMÄSSIGTEM KLIMA

Die Untersuchung der eisenhaltigen Konkretionen, die für drei charakteristische rötliche Bodenprofile vorgenommen wurde, bestand darin, die folgenden Punkten zu erforschen :

— ihre Bedeutung hinsichtlich der anderen Mineralien in den sandigen Fraktionen (statistische Zählung und summarische mineralogische Analyse) ;
— die Morphologie, die Farbe und die Struktur (morphoskopische Untersuchung mittels biokularer Vergrösserungslupe) ;
— die mineralogischen Kennzeichen der Eisenoxyde (Beugung mit Röntgenstrahlen) ;
— die magnetischen Eigenschaften ;
— Gesamteisengehalt und freies Eisen (Deb) ;

Vier Konkretionstypen wurden festgestellt :
in oberflächlichen Böden auf quarzhaltigem Muschelkalk, unregelmässige, eisenreiche (40 bis 50 p. 100 Fe_2O_3) Konkretionen mit Einschliessungen ;
in tiefen schlammigen Böden, fast runde, ferner winkelige, sehr eisenreiche (70 p. 100) Konkretionen, die wie Eisenerz aussehen ;
schliesslich, in der Schichten mit Eisenanhäufungen, Bruchstücke von grossen, unbefestigten, äusserst eisenreichen (70 bis 75 p. 100) Konkretionen.

Die anwesenden Eisenoxyde sind hauptsächlich Hämatit α Fe_2O_3, welchem die charakteristische Farbe dieser Böden zuzuschreiben ist, und die Oxymagnit (Sosmanit) γ Fe_2O_3, die für die magnetischen Eigenschaften verantwortlich ist.

Die magnetische Untersuchung der Konkretionen stellte das Vorkommen von starken, mittelmässigen und unmagnetischen Konkretionen fest. Die magnetischen Konkretionen hängen von dem Gehalt des Bodens an organischen Stoffen ab.

Изучение конкреций соединений железа в красноземах умеренного климата.

Ж. КРЕТЬЕН.

РЕЗЮМЭ

Изучение конкреций соединений железа, проведенное в трех характерных профилях красноземов касалось :

— их значения по отношению к остальным минераллам песчаной фракции (статистический подсчет и поверхностный минералогический анализ).

— их морфологии, окраски и структуры (морфоскопическое изучение под лупой).

— минералогической характеристики окислов железа (диффракция при помощи лучей X);

— их магнитных свойств.

— содержания в них общего и свободного железа.

Было опознано четыре типа конкреций : 1) иррегулярные — со включениями, богатые железом (40-50 % Fe_2O_3), в поверхностной почве лежащей на силикатном ракушечном известняке; 2) и 3) псевдо-круглые и угловидные — имеющие вид богатой железом руды (70 %), в глубоких суглинках; 4) фрагменты крупных но непрочных конкреций богатые железом (70-75 %) в горизонтах накопления этого элемента.

Окислы железа особенно часто встречаются в виде охры α Fe_2O_3, придающей этим почвам характерную окраску, и магматита γFe_2O_3 — ответственного за их магнитные свойства.

Изучение магнитных свойств конкреций показало что они разделяются на сильно намагниченные, средне намагниченные и не обладающие магнитными свойствами, Появление у конкреций магнитных свойств должно быть связанно с содержанием органического вещества в почвах.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAILLÈRE S., KRAUT F., 1954. Les gisements de fer du Bassin Lorrain. *Mém. Mus. nation. Hist. nat. Série C*, **4**, 1, 1-176.

DROSDOFF M., NIKIFOROFF., 1940. Iron-manganèse concretions in Dayton soils. *Soil. Sci.*, 333-345.

DUCHAUFOUR Ph., 1965. *Précis de pédologie*, 2e éd., Masson Paris. 433-434.

GEREI L., 1958. Eisenhaltige Konkretionen in verschiedenen ungarischen. Boden-*Chemie der Erde* (Iéna), **19**, 324-326.

HÉNIN S., LE BORGNE E., 1953. Causes des propriétés magnétiques de certains sols. *C. R. Acad. Sci.*, **236**, 736-738.

HÉNIN S., LE BORGNE E., 1954. Sur les propriétés magnétiques des sols et leurs interprétations pédologiques. *J. Soil Sci.*, **13**, 2, 13-17.

MATSUSAKA Y. et *al.*, 1965. Nature of magnetic minerals in Hawaiien soils. *Soil Sci.*, **100**, 192-199.

OADES J. M., TOWNSEND W., 1963. The detection of ferromagnetic minerals in soils and clays. *J. Soil Sci.*, **14**, 179-187.

SCHROEDER D., SCHWERTMANN U., 1955. Zur Entstehung von Eisenkronkretionen in Böden. *Naturwissenschaften*, **42**, 255-256.

SEGALEN P., 1964. Le fer dans les sols 1-150. *Documentations techniques, O. R. S. T. O. M.*, Paris.

SHERMAN G. O., KANEHIRO Y., 1954. Origin and development of ferruginous concretions in Hawaiian latosols. *Soil Sci.*, **77**, 1-8.

STORRIER R. R., MUIR A., 1962. The characteristics and genesis of a ferritic brown earth. *J. Soil Sci.*, **13**, 2, 259-270.

Ann. agron., 1967, **18** (4), 361-402.

APPRÉCIATION DES CONDITIONS DE LA NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES BASÉE SUR L'ANALYSE DES SUCS EXTRAITS DES TISSUS CONDUCTEURS

W. ROUTCHENKO

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches Agronomiques du Sud-Ouest, 35 - Pont-de-la-Maye

SOMMAIRE

La méthode proposée est basée sur l'appréciation du dynamisme des phénomènes de la nutrition. Les teneurs globales des éléments présents dans le végétal sont considérées comme significatives du niveau de leur absorption, alors que la fraction restant sous la forme minérale est assimilée à une réserve alimentaire interne que la plante utilise, soit par voie métabolique, soit par dilution résultant de la migration des éléments dans les tissus et organes nouveaux. L'importance de la réserve alimentaire interne renseigne sur la fraction qui dépasse les possibilités du végétal de l'utiliser au moment considéré. Ces possibilités sont identifiées aux besoins. L'adoption des bases physiologiques énoncées commande le choix du matériau servant aux analyses, représenté par des extraits frais des tissus conducteurs, ainsi que le choix de l'organe de référence, des techniques et des modes opératoires, qui sont décrits en détail.

Les conditions d'emploi et les normes d'interprétation sont exposées, en utilisant des exemples fournis par des études réalisées au moyen de la méthode décrite.

INTRODUCTION

L'appréciation de la nutrition minérale des plantes, basée sur leur analyse, soulève un certain nombre de difficultés ; c'est à celles-ci qu'il faut imputer le fait qu'aucune de ces techniques ne se soit imposée.

Ces difficultés ont généralement pour cause :

— l'absence de parallélisme entre la concentration d'un élément dans les tissus et la croissance ou le rendement des cultures ;

— les phénomènes antagonistes ou synergiques entre ions qui masquent ou accentuent la valeur de l'ion responsable des troubles ou d'une réduction de développement ;

— l'insuffisance de nos connaissances en matière des relations qui s'établissent

entre la composition alimentaire du milieu et la composition minérale des organes de référence à un instant donné ;

— les fluctuations sensibles de la composition journalière, dans les divers organes ou les sucs, et la redistribution importante au cours du temps de certains éléments dans la plante (C. HUGUET, 1966).

D'autre part, les valeurs fournies par l'analyse de la plante sont parfois difficiles à rapprocher de celles provenant de l'analyse du sol, par suite du manque de précision de certains indices servant à caractériser le potentiel alimentaire du milieu, ou en raison des changements affectant ces valeurs à la suite de variations des facteurs tels que : approvisionnement en eau, température, techniques culturales, etc.

Les différentes possibilités actuellement utilisées dans les laboratoires agronomiques peuvent être classées en deux catégories, qui se distinguent soit par la nature des organes à analyser, soit par la façon dont on apprécie les éléments minéraux qu'ils renferment.

Le premier groupe rassemble les procédés basés sur l'analyse globale des principaux éléments nutritifs : soit dans la plante entière, soit, le plus fréquemment, dans un organe de référence.

Les méthodes les plus représentatives de cette tendance sont l'analyse foliaire de MAUME et LAGATU et la triple analyse de LUNDEGARDH. Ces procédés renseignent principalement sur le niveau de l'absorption des principaux ions alimentaires mais ne fournissent pas d'indications sur la façon dont la plante utilise les éléments absorbés. Par suite, ils sont plus aptes à contribuer à l'étude des conditions alimentaires d'un milieu qu'à fournir les éléments d'un diagnostic de la nutrition des plantes ou des troubles d'origine trophique dont elles peuvent être le siège.

Le reflet qu'ils fournissent du potentiel alimentaire du milieu est également imparfait car il ne peut être tenu compte des pertes et des restitutions d'éléments qui s'opèrent en cours de végétation et surtout du phénomène, dit de dilution, résultant d'un développement plus ou moins important de la plante. Ce phénomène est, en particulier, responsable de l'étroitesse des limites entre lesquelles s'inscrivent les indices susceptibles d'être considérés comme significatifs vis-à-vis du niveau de l'alimentation, en sorte que le degré d'une insuffisance ou d'une consommation de luxe ne peut être exactement apprécié. Il arrive même qu'on enregistre une réduction de développement alors que l'analyse globale indique un enrichissement des tissus en certains éléments (DEMOLON, 1954).

Dans la seconde catégorie, on pourrait classer les procédés faisant appel à l'analyse d'extraits frais d'organes dans lesquels on détermine seulement certaines formes des éléments dont les variations sont considérées comme significatives vis-à-vis du niveau de la nutrition de la plante en ces mêmes éléments.

L'expérimentation des techniques basées sur l'analyse limitée à la fraction minérale, préconisées notamment par VIETS, H. L. MOXON, E. I. WITEHEAD (1946), D. J. D. NICHOLAS (1953), K. P. MAGNITSKI (1958), N. TEPE (1963), nous a permis de constater que, dans certains cas, leurs résultats étaient difficiles à interpréter.

En réfléchissant à ces difficultés, nous avons été conduits à penser qu'un diagnostic sur la nutrition devait mettre en cause à la fois les informations portant sur l'intensité avec laquelle les éléments pénètrent dans la plante et, d'autre part, sur le rythme de leur utilisation.

Il fallait donc mettre au point une méthode basée sur la recherche non seulement des teneurs mais aussi des formes, renseignant sur les conditions d'utilisation, et un système de comparaison permettant de juger, à partir de ces valeurs, de l'état de la nutrition du végétal.

Parallèlement, il fallait mettre au point des techniques analytiques permettant de doser les éléments sous différentes formes, de manière suffisamment significative d'une part et, d'autre part, dans des conditions telles que la composition du milieu n'évolue pas pendant la période d'application de ces méthodes analytiques. Il fallait également choisir les organes des plantes sur lesquels les analyses ainsi effectuées avaient le plus de chances de fournir des indications significatives.

Le but de ce mémoire est de présenter l'ensemble des résultats obtenus et d'indiquer le principe de la méthode que nous sommes appelés à proposer à la suite de ces recherches. Ces travaux ont surtout été conduits sur le Maïs mais 23 autres espèces végétales ont fait l'objet d'observations plus ou moins complètes.

La méthode proposée est susceptible d'une assez large application, puisqu'elle a permis d'établir un diagnostic sur l'état clinique des troubles intéressant la nutrition de la plante dans un grand nombre de cas.

PREMIÈRE PARTIE

1. Fondements de la méthode proposée

A — *Appréciation du niveau de l'alimentation*

Compte tenu des objectifs que nous nous étions proposé d'atteindre, nous avons admis, avec Maume et Lagatu, Lundegarth, Homes et d'autres chercheurs, que l'analyse globale pouvait procurer un reflet suffisamment fidèle de la fourniture par le sol des principaux éléments, à condition cependant qu'il soit tenu compte du développement pris par le végétal.

En conséquence, nous avons fondé l'appréciation du niveau de l'absorption des principaux éléments métaboliques : N, P et S, sur la détermination de leur taux, tant sous la forme organique que minérale, alors que les indices se rapportant exclusivement à la forme ionique des éléments permettent de caractériser l'alimentation de la plante en K, Ca, Mg, Na et Cl (D. J. D. Nicholas, 1953 ; Magnitski, 1958 ; B. E. Gilbert, 1926).

B — *Appréciation de l'intensité de l'organisation*

Pour atteindre le second de nos objectifs : apprécier à l'aide des résultats analytiques les conditions d'utilisation, par le végétal, des ions absorbés, nous avons fait appel aux principes qui régissent le processus de l'intégration primaire des ions métaboliques et celui de la répartition dans les divers organes de la plante des éléments ne contractant pas de liaisons organiques permanentes.

Les connaissances acquises par voie expérimentale, en matière de diagnostic de la nutrition minérale des plantes basé sur l'appréciation de la seule forme minérale des éléments, nous conduisent à considérer cette fraction comme étant une « réserve minérale interne » dans laquelle le végétal puise en fonction de ses possibilités de les intégrer au moment considéré : par voie d'organisation s'il s'agit d'éléments métabo-

liques (N, P, S) ; par transfert dans les tissus et organes en formation quand il s'agit d'éléments restant sous la forme ionique, (K, Na, Cl) ou de ceux qui se trouvent partiellement intégrés dans des corps organiques (Ca, Mg).

Tout en reconnaissant à certaines substances intermédiaires du métabolisme, notamment aux amides, une fonction de réserve, nous préférons, dans le cadre de la méthode proposée, attacher à ce terme une signification basée sur des données physiologiques et analytiques.

C — *Fondements physiologiques*

Les fondements physiologiques reposent sur les conditions de l'intégration primaire des ions métaboliques qui ne peut s'opérer que dans la mesure où la fourniture d'énergie et de substances acceptantes issues de l'activité photosynthétique, de la respiration et des oxydations cellulaires, est assurée à un rythme correspondant à la vitesse de pénétration des ions minéraux.

Si l'activité organisatrice de la plante est insuffisante, une partie des éléments absorbés s'accumule sous la forme ionique. Ces excédents ne participent pas à la croissance ou au développement de la plante et peuvent intervenir dans un sens dépressif, par suite de l'occupation des sites normalement dévolus à d'autres éléments, ou même par un effet direct si leur concentration dépasse le seuil de toxicité qui leur est propre.

Le rôle futur de la « réserve minérale interne » reste indéterminé ; il dépend de l'ensemble des conditions écologiques à venir, comme des facteurs internes propres au végétal.

Ces considérations justifient l'assimilation des besoins d'une plante en éléments minéraux aux possibilités qu'elle a, au moment considéré, de les utiliser.

La rigueur d'une telle définition des besoins doit cependant subir une correction importante dans le domaine de son application au diagnostic de la nutrition des plantes car il doit être tenu compte de la cinétique des diverses réactions métaboliques, autrement dit : un certain niveau de la « réserve minérale interne » est indispensable pour assurer le déroulement normal des phénomènes de la nutrition, de la croissance et du développement de la plante.

D — *Indices de référence de la nutrition anionique*

La connaissance des niveaux de référence paraît indispensable à l'appréciation de la nutrition de la plante en N, P et S. Ils caractérisent les conditions optimales de la nutrition en ces trois éléments, compte tenu du niveau des autres facteurs alimentaires. Au-dessus et au-dessous de ce niveau, le développement de la plante se trouvera déprimé par insuffisance ou excès de l'élément considéré.

Nous avons pu nous rendre compte qu'il était possible de définir le niveau de chacun des éléments métaboliques N, P et S par le rapport entre la teneur de la fraction minérale et la quantité totale de l'élément, contenue dans la plante et surtout dans un organe de référence.

Nous appelons « indices métaboliques » les trois rapports :

N minéral p. 100 N soluble total,
P minéral p. 100 P soluble total,
S minéral p. 100 S soluble total.

Une relation inverse relie un quelconque de ces indices aux deux autres : lorsque, en partant d'un niveau d'alimentation insuffisant pour l'un d'eux, on accroît sa fourniture, l'indice relatif à cet élément augmente alors que les deux autres diminuent.

Par ces comparaisons, il est possible d'établir les niveaux de N, P et S conduisant au rendement optimum, lorsque celui-ci est contrôlé par les possibilités synthétiques de la plante (c'est-à-dire qu'aucune autre condition du milieu ne joue le rôle de facteur limitant).

Les changements affectant l'alimentation en azote produisent l'effet le plus marqué sur les indices de P et de S, tandis que les variations de l'alimentation en phosphore affectent moins énergiquement les taux de N et de S. Les modifications des apports de soufre produisent l'effet le moins accusé.

La valeur optimale des indices métaboliques varie en fonction du stade du développement et de l'intensité de croissance de la plante.

La signification des indices métaboliques fournis par l'analyse peut également être modifiée par l'intervention d'un facteur limitant autre que la nutrition de la plante en N, P et S.

D'autre part, le changement du rapport Nm. p. 100 N. S. T. serait, d'après J. M. Daly (1949), R. W. Hanks et A. V. Feldmann (1963), une réponse générale des plantes à l'infestation parasitaire.

A côté du dosage des trois anions métaboliques, nous avons introduit dans la méthode proposée celui de Cl^-, pour les raisons suivantes :

— accumulation croissante de Cl^- au cours de la vie du végétal, due à une utilisation métabolique insuffisante et susceptible d'atteindre des niveaux toxiques ;

— importance relative de Cl^- au sein de la somme des anions minéraux et, par suite, dans le maintien de l'équilibre ionique de la plante ;

— relation synergique K^+/Cl^- et antagonisme marqué Cl^-/NO_3^- au niveau de l'absorption, qui peuvent expliquer l'origine de certains troubles de la nutrition azotée en présence de taux excessifs de Cl^-.

E — *Indices de référence de la nutrition cationique*

La qualité et l'intensité de la nutrition cationique sont appréciées en se fondant sur les principes suivants :

— La part des cations absorbés se trouvant engagée dans des liaisons organiques permanentes étant faible, l'analyse de la forme minérale suffit (sauf pour Ca). Les teneurs de chaque cation contenu dans les extraits de tissus frais permettent d'apprécier le niveau de leur absorption.

— L'utilisation des cations absorbés ne relève pas exclusivement ni directement des processus de synthèse mais peut s'effectuer par leur transfert dans les tissus et les organes nouveaux. Par suite, la signification de leur taux ne peut être exactement appréciée sans qu'il soit tenu compte du développement pris par le végétal.

— L'intensité de la nutrition cationique peut être appréciée par le rapport : $\frac{\text{somme des cations}}{\text{somme des anions minéraux}}$ alors que le pourcentage de la teneur en chaque cation par rapport à leur somme renseigne sur l'équilibre de la nutrition cationique de la plante.

La validité de ces critères repose sur les données suivantes :

— La capacité globale d'une plante d'absorber des cations est étroitement contrôlée par son équilibre ionique. Elle se trouve par conséquent liée au niveau de l'absorption et de l'organisation des anions minéraux et à la production d'anions organiques qui interviennent ici en tant que facteurs de régulation du pH interne des végétaux. A. ULRICH (1942), M. BURSTROM (1943), J. HOMES (1956), D. BLANC (1964), considèrent qu'il existe un rapport particulier à chaque génotype entre la somme des anions et la somme des cations, permettant à la plante de parvenir à son développement maximum.

— La faculté d'absorber préférentiellement un cation utile paraît faible chez les végétaux terrestres annuels. Il semble que l'équilibre suivant lequel les différents cations pénètrent dans la plante soit avant tout fonction de la proportion dans laquelle les fractions assimilables de ces éléments sont présentes dans le sol (D. BLANC, 1962 ; G. Van SCHOOR, 1956) et de l'activité des différents cations.

Les motifs d'ordre physiologique qui nous font établir une nette distinction entre la masse globale d'un élément présent dans la plante et sa fraction minérale relèvent, par conséquent, de la nature des phénomènes qui les contrôlent, des relations qui les unissent et de la signification particulière à attribuer aux indices qui servent à les caractériser.

Sur le plan analytique, la perte de réactivité des éléments « organisés » vis-à-vis de leurs réactifs habituels rend aisée la distinction entre les deux fractions.

2. CHOIX DU TISSU DE RÉFÉRENCE

La plupart des procédés de diagnostic basés sur l'analyse globale utilisent la feuille, c'est-à-dire un organe composé du réseau terminal des tissus conducteurs et d'un parenchyme assimilateur constitué par des cellules palissadiques.

La composition minérale des deux types de tissus étant très différente du point de vue chimique, certaines méthodes préconisent la suppression de la nervure principale, afin de rapprocher le plus possible la composition de l'échantillon analysé de celle des tissus assimilateurs.

On se trouve donc en présence d'un matériau plus ou moins hétérogène, dont la composition chimique peut dépendre de la proportion dans laquelle les deux types de tissus y sont représentés.

Les éléments minéraux contenus dans les cellules palissadiques sont, en majorité, intégrés dans des corps organiques insolubles ou se trouvent sous forme de pseudo-solutions. Ils se répartissent entre les divers constituants cellulaires tels que : parois, vacuoles, cytoplasme et noyau ayant une composition chimique relativement constante. Les variations qui affectent l'alimentation de la plante intéressent principalement la composition des sucs vacuolaires, c'est-à-dire seulement l'un des constituants de la cellule, ce qui limite leur effet sur la composition chimique moyenne du matériau analysé.

Le phénomène qui tend également à maintenir la constance de la composition minérale des tissus assimilateurs est celui des compensations qui peuvent s'opérer dans le temps, soit par suite des changements de la zone explorée par son système radiculaire, soit par suite des variations intéressant les différents facteurs du milieu.

Le rôle de ces compensations est particulièrement important dans le cas des

plantes annuelles ; aussi, avec les méthodes de diagnostic faisant appel à l'analyse d'un tissu assimilateur et à l'interprétation basée sur des niveaux de référence établis expérimentalement, est-on contraint d'attendre que les compensations aient produit leur effet. Ainsi ces méthodes ne font appel qu'à des organes parvenus à la maturité physiologique.

Outre qu'un tel impératif exclut la possibilité d'un diagnostic précoce et la correction des fumures en cours de végétation, il rend difficile l'étude des phénomènes susceptibles de se produire pendant la période végétative, ou celle de la réponse des plantes aux variations des différents facteurs du milieu.

Contrairement au parenchyme assimilateur, les tissus conducteurs se composent de cellules squelettiques, ayant perdu pour certaines leur cytoplasme, les vacuoles et même le noyau, en sorte que leur composition propre n'intervient pratiquement pas dans la composition des sucs qui y circulent. Ceux-ci reflètent fidèlement les conditions alimentaires et métaboliques existant au moment du prélèvement de l'échantillon, ce qui fait qu'ils peuvent présenter des variations importantes de composition chimique.

La variabilité de la composition minérale des sucs extraits des tissus conducteurs rend difficile l'interprétation des résultats analytiques, lorsque celle-ci est basée sur des taux de référence établis expérimentalement et valables seulement pour un certain niveau d'intervention des facteurs du milieu. Par contre, cette variabilité ne constitue pas un obstacle si l'on peut séparer la part qui revient à l'absorption de celle qui a trait à l'organisation.

Si l'on fait appel à l'analyse de la plante dans le but d'apprécier les conditions de sa croissance et de son développement, on voit mal comment il serait possible d'atteindre un tel objectif si les variations des facteurs tels que l'intensité et la durée de l'éclairement, la température ou l'approvisionnement en eau, ne se traduisaient pas par des modifications de la composition chimique du matériau analysé.

La composition chimique des sucs, sensible à l'intervention de tout facteur du milieu externe, permet de déceler la manifestation d'un phénomène nutritionnel ou un changement des conditions du milieu au moment où il se produit, de mesurer leur intensité et de suivre leur évolution. De plus, le diagnostic devient possible à n'importe quel stade, à partir du moment où la jeune plantule a cessé d'être alimentée par l'organe reproducteur et jusqu'au moment de la floraison.

La nature des variations de la composition chimique des sucs dues aux phénomènes métaboliques offre un intérêt particulier dans le domaine du diagnostic des troubles de la nutrition minérale.

Les prélèvements d'éléments, par voie métabolique ou par transfert dans les organes en formation, s'opèrent suivant un certain équilibre, commandé par la composition chimique des substances synthétisées et des tissus nouveaux, de telle sorte qu'un élément absorbé en quantité équivalant aux besoins peut n'être présent dans le suc qu'à l'état de traces, alors que ceux qui pénètrent dans la plante suivant un rythme supérieur à l'utilisation s'accumulent (W. ROUTCHENKO et J. DELMAS, 1962-1963). La distorsion des taux qui en résulte rend particulièrement aisée l'étude des troubles de la nutrition et la mise en évidence de la déficience ou de l'excès qui en sont responsables.

La différence de composition chimique entre les deux types de tissu repose

également sur les conditions de passage des ions minéraux à travers les parois cellulaires. Les difficultés que paraissent avoir certains ions pour pénétrer dans le tissu palissadique ont été signalées par de nombreux auteurs. W. TEPE (1963) signale qu'en ce qui concerne l'ion NO_3^-, dans le cas de l'oranger, la chute de teneur entre le pétiole et le limbe peut atteindre 99 p. 100. D. BLANC (1964) constate, sur la tomate, que les différences entre les teneurs en azote total du limbe varient peu et ne sont que faiblement significatives, alors que les taux de l'azote nitrique du pétiole sont étroitement liés à l'intensité de la fertilisation azotée. J. CARLES et *al.* (1964) parviennent aux mêmes conclusions dans le cas de la Vigne.

La présence simultanée, dans le pétiole ou les nervures, du xylème et du phloème ne semble pas modifier sensiblement la composition minérale de l'extrait de ces organes. Nous avons comparé les teneurs en éléments minéraux des sucs extraits par éthérolyse de la nervure de la quatrième feuille du maïs se trouvant au stade de 10 feuilles, avec celle du suc exsudé après sectionnement des tiges à la hauteur d'insertion de la même feuille. La différence de composition minérale entre les deux extraits était à peine perceptible pendant les deux premières heures, après quoi on a assisté à un appauvrissement progressif du suc exsudé en certains éléments.

Pour ces diverses raisons, nous avons choisi d'utiliser comme matériau d'analyse les sucs extraits des tissus conducteurs.

3. ÉLÉMENTS DOSÉS ET FORMES SOUS LESQUELLES ILS SE TROUVENT APPRÉCIÉS

Dans un premier temps, nous avons limité les dosages aux éléments jouant quantitativement un rôle important dans la nutrition minérale des plantes. Leur extension aux éléments catalytiques peut être envisagée. Les dosages prévus par la méthode actuellement employée portent sur :

les anions NO_3^-, $PO_4H_2^-$, SO_4^-, Cl^- ;
les cations NH_4^+, K^+, Ca^{++}, Mg^{++}, Na^+.

D'autre part, on apprécie les teneurs globales en N, P et S.

Étant donné l'importance, du point de vue métabolique, des étapes successives de l'organisation de l'azote et du phosphore, les précédentes déterminations sont complétées par le dosage de l'azote aminé, amidé et protéique et du phosphore glucidique et protéique.

Il se peut que ces dernières déterminations ne s'imposent pas dans l'avenir d'une façon systématique. Cependant, nous avons préféré les inclure et les maintenir dans la méthode actuellement proposée tant que les conditions dans lesquelles il y a lieu d'y recourir ne sont pas suffisamment précisées.

Les poids de matière fraîche et de matière sèche de l'organe assimilateur attenant au tissu conducteur analysé,

— feuille entière si l'on utilise le pétiole,

— les deux demi-limbes dans le cas de l'utilisation de la nervure principale,

servent à établir l ' « indice de développement ».

On apprécie la qualité et l'intensité de l'alimentation azotée, ainsi que les conditions d'utilisation de l'azote, en considérant la valeur de N dans les différentes fractions d'une part, et le taux de l'azote soluble total de l'autre, tant en valeur absolue que sous forme des rapports : N minéral p. 100 N. S. T., N/P et N/K, NO_3^-/Cl^-.

De même, l'appréciation de la nutrition phosphorique est fondée sur les indices relatifs au phosphore minéral, phosphore glucidique, phosphore du précipité protéique et phosphore soluble total.

Les rapports P minéral p. 100 P. S. T., N/P, K/P, S/P, permettent de préciser la signification des indices relevés.

Pour le soufre, les teneurs en S minéral, S soluble total et leur rapport centésimal paraissent suffisants pour juger le niveau de l'alimentation et les conditions d'utilisation de cet élément.

La teneur en Cl^- est appréciée par le taux de Cl^-, le rapport Cl^-/NO_3^- et Cl^- p. 100 de la somme des anions.

La somme des anions (NO_3^-, $PO_4H_2^-$, SO_4^{--}, Cl^-), exprimée en milliéquivalents par litre d'extrait, est rapprochée de la somme des cations (K^+, Ca^{++}, Mg^{++}, NH_4^+, Na^+).

La nutrition cationique est jugée en considérant les taux de chaque cation, exprimés en mg d'élément par litre d'extrait et en milliéquivalents pour cent de la somme des cations. Des rapports particuliers tels que K/Mg, K/N, K/Ca, sont établis sur une base pondérale.

4. Choix de l'organe de référence

Le choix de l'organe dont on extrait le suc est commandé à la fois par la morphologie de l'espèce et par le stade de croissance de la plante au moment du prélèvement.

Dans le cas du maïs, espèce qui a servi à la mise au point de la méthode, on utilisera les deux premiers entre-nœuds pendant la période de 4 à 6 feuilles. A partir du moment où la plante possède 10-12 feuilles et jusqu'au stade de l'apparition de la panicule mâle, l'organe de référence est constitué par la moitié basale de la nervure de la sixième feuille.

TABLEAU I

Taux des éléments présents sous la forme minérale
(en mg/litre d'extrait) — Stade 8 feuilles
Dispositif Sourbès, à Gaillères (Landes), 2 juin 1965

Étage foliaire	N (NO_3^-)	P ($PO_4H_2^-$)	S (SO_4^{--})	Cl^-	N (NH_4^+)	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}	Na^+
8	162	38	26	430	41	1 800	138		21
7	220	43	21	620	23	2 200	152	128	28
6	365	36	21	740	21	1 860	166	134	28
5	488	36	17	760	21	1 650	176	148	24
4	526	38	10	780	14	1 400	176	152	23
3	422	23	11	810	6	1 320	186	160	17
1 + 2	218	14	7	720	8	1 210	124	110	12

Ce choix repose sur la répartition des éléments dans la plante aux différents stades physiologiques.

A titre d'exemple, nous reproduisons dans les tableaux 1 et 2 les résultats d'analyse se rapportant à du *Funk's G 17 A*, provenant d'un dispositif établi en sol

sableux ayant reçu une fumure N-P-K = 125-100-100, un apport de 100 kg de chaux magnésienne ayant été effectué l'année précédente. Le semis a eu lieu le 3 mai 1965, le premier échantillonnage le 2 juin et le second le 19 juillet.

On constate que les taux de la plupart des éléments se répartissent suivant des gradients croissants pour les uns (P, S, N (NH_4^+), K, Na) et décroissants pour les

TABLEAU 2

Taux des éléments présents sous la forme minérale
(en mg/litre) — Stade de la floraison
Dispositif Sourbès, à Gaillères (Landes), 19 juillet 1965

Étage foliaire	Anions				Cations				
	N (NO_3^-)	P ($PO_4H_2^-$)	S (SO_4^{--})	Cl^-	N (NH_4^+)	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}	Na^+
Pédoncule de l'inflor. mâle ..	270	193	117	1 300	77	2 250	40	400	166
12e + 13e f...	360	100	53	2 272	40	4 250	46	1 000	350
11e feuille	440	85	30	1 704	18	3 300	76	1 000	120
10e feuille	840	27	17	2 543	17	3 500	91	750	116
9e feuille	1 080	33	11	2 250	13	2 583	212	400	133
8e feuille	1 400	20	11	1 480	8	2 083	293	66	116
7e f. (épi) ..	1 720	20	20	1 475	18,6	2 333	202	333	133
6e f. (f. réf.) ..	2 920	30	20	1 183	1,3	2 513	192	400	133
5e feuille	1 420	36	23	1 063	1	3 187	87	380	187
3e + 4e f. ..	312	40	11	2 175	0,25	3 750	170	422	200
1re + 2e f. ..	—	—	—	—	—	—	—	—	—

TABLEAU 3

Eléments solubles totaux, en mg par litre de suc
Dispositif Sourbès, Gaillères (Landes), 19 juillet 1965

Étage foliaire	N. S. T.	P. S. T.	S. S. T.	Ca S. T. (1)
Pédoncule de l'inflorescence mâle	784	392	228	660
12e + 13e feuilles	680	288	108	1 840
11e feuille	928	196	68	1 470
10e feuille	1 208	132	52	1 170
9e feuille	1 376	158	44	950
8e feuille	1 816	60	48	647
7e feuille (épi)	2 464	92	56	933
6e feuille (feuille de référence).....	3 456	52	60	990
5e feuille	1 720	88	84	890
3e et 4e feuilles.....	680	232	64	1 152
1re et 2e feuilles	—	—	—	—

(1) Ca^{++} + Ca du précipité alcoolique.

autres (N (NO_3^-), Cl, Mg, Ca) les deux premiers et le dernier étages ne participant pas, la plupart du temps, à cette répartition. Les deux premiers étages renferment les taux les plus bas, toute déficience y apparaît d'une façon particulièrement nette. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi les deux premiers entre-nœuds pour servir de matériau d'analyse en vue des diagnostics précoces.

Au moment de la formation des organes de reproduction, on assiste à une redistribution des taux ; le niveau d'insertion de ces organes paraît jouer un rôle de pôle d'attraction pour certains éléments ou substances métaboliques, alors que pour d'autres les concentrations les plus élevées se situent au-dessus ou au-dessous de la feuille de l'épi. Les tableaux 2, 3 et 4 illustrent ces changements.

TABLEAU 4

Répartition des différentes formes d'azote en fonction de l'étage foliaire
(en mg de N par litre de suc)
Dispositif Sourbès, Gaillères (Landes), 19 juillet 1965

Étage foliaire	N minéral			N organique		N soluble total
	NO_3^-	NH_4^+	$NO_3^- + NH_4^+$	aminé + amidé	protéique	
Pédoncule de l'inflorescence mâle	270	77,3	347,3	430,20	6,50	784
12e + 13e feuilles	360	40	400	254	26	680
11e feuille	440	18,2	458,2	447,3	22,50	928
10e feuille	840	17,3	857,3	330,7	20	1 208
9e feuille	1 080	13,3	1 093,3	250,2	32,50	1 376
8e feuille	1 400	8	1 408	369	39	1 816
7e feuille (épi)	1 720	18,6	1 738,6	702,9	22,50	2 464
6e feuille	2 920	1,3	2 921,3	528,2	6,50	3 456
5e feuille	1 420	1	1 421	269,25	29,75	1 720
3e et 4e feuilles	312	0,25	312,25	269	98,75	680
1re et 2e feuilles	—	—	—	—	—	—

Les taux de N aminé + amidé sont établis par différence.

La plupart des méthodes de diagnostic de la nutrition minérale du Maïs utilisent la feuille de l'épi. Pratiquant de préférence le diagnostic pendant la période végétative, nous avons choisi, avec J. T. MURDOCK (1962), la 6e feuille pour les raisons suivantes :

— jusqu'à la floraison, la feuille de l'épi ne peut être déterminée avec certitude ;

— les feuilles des étages inférieurs sont souvent abîmées et quelquefois desséchées ;

— les taux sont particulièrement significatifs du niveau de l'alimentation (J. T. MURDOCK, 1962) en la plupart des éléments.

L'exemple cité indique que le choix de l'organe à prélever en vue de l'analyse doit être fait en considérant en premier lieu la morphologie de l'espèce étudiée et les stades physiologiques auxquels on se propose d'effectuer des contrôles.

DEUXIÈME PARTIE

MODES OPÉRATOIRES ET TECHNIQUES ANALYTIQUES

PRÉLÈVEMENT ET FIXATION DES ÉCHANTILLONS

La nature de l'organe de référence qui sera prélevé se trouve déterminée par l'espèce végétale à laquelle on s'adresse et dépend du stade physiologique atteint au moment de l'échantillonnage. Au champ, quelle que soit la culture, le choix des plantes sur lesquelles les prélèvements seront faits est soumis aux règles générales suivantes :

— les plantes seront représentatives de la zone de culture étudiée, en ce qui concerne le stade physiologique, le développement et l'aspect ;
— les bordures et les zones de densité anormale seront éliminées. On évitera aussi les surfaces présentant des accidents de relief.

Ces restrictions n'ont pas de raison d'être lorsqu'il s'agit de culture en milieu contrôlé mais, dans tous les cas, on s'abstiendra d'effectuer des prélèvements dans les 48 heures qui suivent des changements affectant les conditions d'alimentation en eau ou des variations importantes de la température et de l'éclairement.

— Les prélèvements seront toujours exécutés dans les 3 ou 4 heures qui suivent le lever du soleil.

Le matériel transporté sur place comprend :

— une glacière portative, contenant un bloc de neige carbonique et des tubes de 100 cm^3, numérotés et fermés à l'aide de couvercles à vis ; ils contiennent 50 cm^3 d'éther sulfurique porté à — 30-35°C ;
— une paire de ciseaux inoxydables, coton, alcool éthylique ;
— poches en plastique numérotées et élastiques pour les fermer ;
— carnet de prélèvement.

Mode opératoire.

La plante et l'organe étant déterminés, on s'assure de leur propreté et, si nécessaire, on les nettoie avec un tampon de coton imbibé d'alcool.

On commence par prélever le tissu assimilateur — feuille ou demi-limbe suivant le cas — que l'on recueille dans la poche plastique, refermée aussitôt hermétiquement à l'aide d'un élastique.

L'organe conducteur (jeune pousse, pétiole ou nervure) ainsi dégagé est débité dans un tube en fragments de 0,5 à 1 centimètre, qui tombent directement dans l'éther à — 30-35°C. Rebouché, le tube est remis dans la glacière.

Ainsi le tissu prélevé se trouve-t-il fixé au moment même où il est séparé de la plante, ce qui répond aux nécessités d'une analyse portant, à la fois sur les ions minéraux et les substances partiellement ou totalement métabolisées faisant partie d'un milieu biologique particulièrement actif.

Nous avons renoncé au procédé utilisant l'alcool bouillant, en partie en raison des inconvénients d'ordre pratique mais aussi par crainte de réactions oxydasiques, des risques de perte d'azote ammoniacal et de rupture possible des liaisons phospho-glucidiques. Quand aux procédés de séchage, G. COLLET (1963) a démontré qu'ils n'offraient pas non plus de sécurité suffisante. Par contre, le froid est devenu d'un emploi aisé grâce à la neige carbonique et évite tout risque d'oxydation, comme l'indiquent G. T. NICHTINGALE, W. R. ROBBINS et coll. (1937), alors que selon N. WATTIEZ et F. STERNON (1935) l'éther exerce une action inhibitrice sur l'activité des enzymes.

Les échantillons ainsi traités peuvent être conservés pendant plusieurs jours à la glacière. On peut également extraire les sucs et les soumettre à la lyophilisation.

Les procédés de prélèvement utilisés permettent à un laboratoire d'étendre son activité à des lieux distants d'environ 200 kilomètres.

EXTRACTION ET ÉPURATION DES SUCS

Le rôle de l'éther, dans lequel les fragments de tissus sont plongés au moment du prélèvement, ne se limite pas au blocage de l'activité enzymatique et à la conduction thermique ; l'éthérolyse facilite l'extraction et participe à l'épuration des sucs.

L'éther retient la chlorophylle, les caroténoïdes, les lipides et en partie les alcools, aldéhydes, cétones, esters et nitriles. Il reste dans le suc : les ions minéraux, les sucres, pectines, gommes et mucilages, les globulines, prolines glutélines, les nucléoprotéines, les phosphoprotéines, chromoprotéines, lécitoprotéines, de même que les acides organiques, les glucosides, alcaloïdes, les amines et amides, ainsi que les hormones et les vitamines.

Avant de procéder à l'extraction, les échantillons sont ramenés à la température du laboratoire. L'éther et les fragments d'organes sont transférés dans une presse. L'effort de compression à exercer n'excède pas 1 kg à 1,5 kg/cm², il dépend du degré de lignification des tissus. Le suc et l'éther sont versés dans une ampoule à décanter et brassés ensemble. Les travaux de J. D. SAYRE et V. M. MORRIS (1932) ont démontré qu'il n'y avait pas de variation de composition minérale entre les fractions extraites successivement par pression d'un tissu végétal. Ces auteurs ont également comparé les résultats d'analyses portant sur des extraits alcooliques et sur les extraits obtenus par pression. Les corrélations avec la composition en éléments totaux des tissus se sont avérés supérieurs dans le second cas. VIETS, MOXON et coll. (1946) considèrent de leur côté que la composition minérale d'un tissu végétal, en ce qui concerne les éléments solubles, peut être déterminée par l'analyse des sucs extraits par pression ; R. W. NEWTON, R. BROWN et coll. (1926), ainsi que J. K. WILSON (1943) concluent dans le même sens.

Lorsque les deux phases se trouvent séparées, on place sous l'ampoule un filtre d'Allihn surmontant une fiole à vide plongée dans un bain de glace. Le suc est rapidement filtré sous vide partiel et placé aussitôt dans le congélateur.

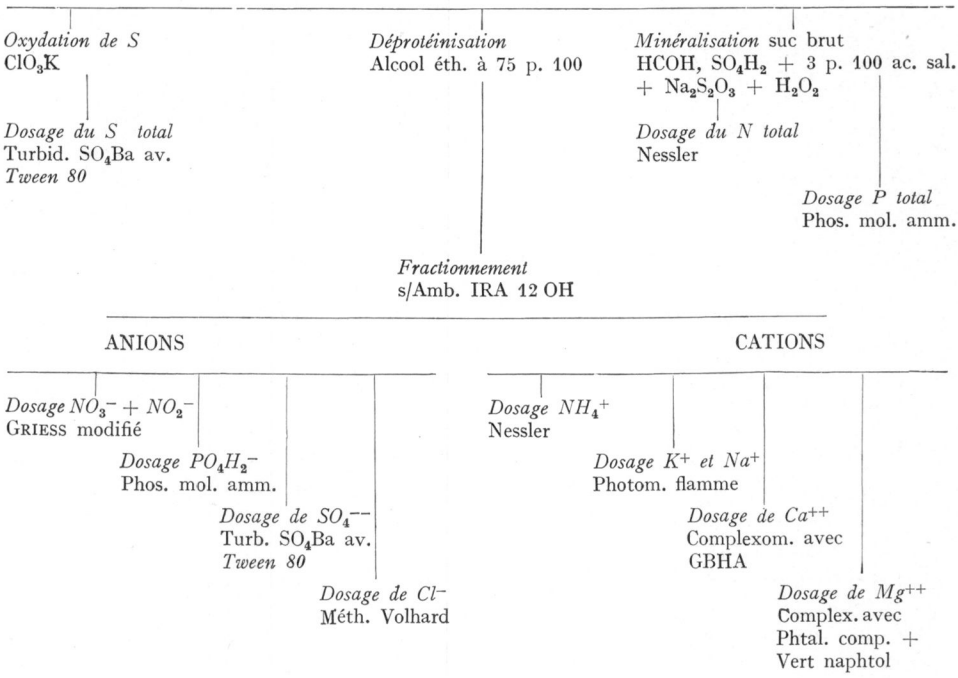
ORGANISATION DU TRAVAIL ANALYTIQUE

Les tableaux 5 et 6 indiquent l'ordre et l'enchaînement des opérations qui peuvent être effectuées au laboratoire.

TABLEAU 5

Schéma des opérations analytiques

Prélèvement. Fixation. Éthérolyse. Extraction. Séparation. Filtration. Conservation

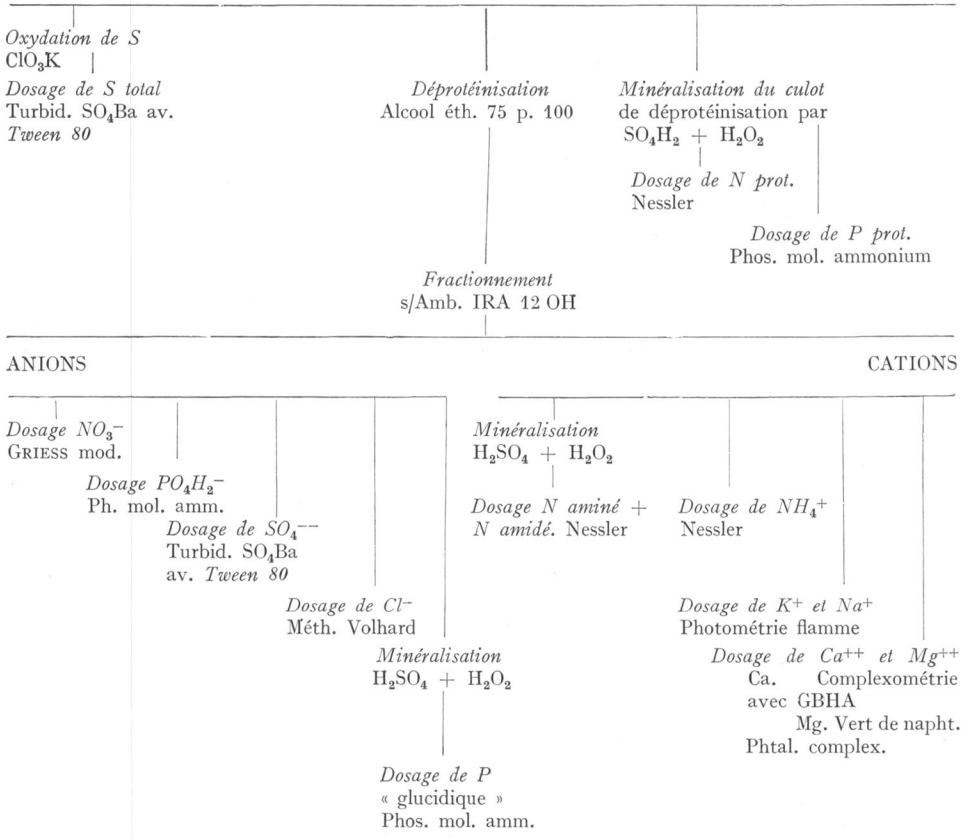


L'ensemble des opérations demande à deux techniciens bien entraînés 2 jours et demi à 3 jours de travail ; 10 à 12 échantillons sont traités en même temps, sans exiger un matériel autre que celui qui équipe normalement un laboratoire agronomique.

TABLEAU 6

Schéma des opérations analytiques

Prélèvement. Fixation. Éthérolyse. Extraction. Séparation. Filtration. Conservation



DÉPROTÉINISATION ET FRACTIONNEMENT DES SUCS

Nous utilisons l'alcool éthylique comme agent précipitant les protéines. Sa concentration est portée à 75 p. 100. Le mélange est abandonné à la glacière à + 1° + 2°C pendant une nuit. La séparation est effectuée à l'aide d'une centrifugeuse réfrigérée.

— on verse 5 cm³ de suc épuré dans un tube de centrifugeuse de 25 cm³ ; on ajoute :

— 15 cm³ d'alcool éthylique absolu, pour analyses ;

— on bouche, on agite et on abandonne pendant 12 heures à 1° ou 2°.

La centrifugation est poursuivie pendant 30 minutes à 3 500 *g*.

— le surnageant est versé dans une fiole jaugée de 25 cm³ ;

— une nouvelle portion de 5 cm³ d'alcool à 75 p. 100 est versée dans le tube et le dépôt remis en suspension ;

— la suspension est centrifugée pendant 10 minutes ; le surnageant est ajouté au précédent.

Le culot protéique est alors additionné de 10 cm³ de H_2SO_4 N/10 et sera minéralisé par la suite, pour permettre le dosage de N et de P protéiques et du Ca lié aux acides organiques partiellement précipité par l'alcool.

Les 25 cm³ de solution déprotéinisée sont versés sur une colonne de résine cationique. Les colonnes sont constituées par un tube capillaire coudé en forme de Z ; la branche inférieure est soudée par un tube de ø intérieur égal à 5 mm, surmonté à son tour d'un réservoir de 25 cm³. Le volume interne du tube de 5 mm est d'environ 10 cm³ et il est occupé par la résine.

Parmi les nombreux types de résine qui peuvent être employés, nous avons choisi l'Amberlite IR 120 en cycle H, 16-50 meshes, dont la capacité d'échange est de 1,9 méq. par cm³ de résine humide.

La somme de cations généralement contenus dans les sucs végétaux étant de l'ordre de 0,300 à 0,400 méq. par cm³, la capacité totale de la colonne dépasse de 500 p. 100 les teneurs en cations des 5 cm³ de suc qui constituent la prise.

Les colonnes ainsi constituées laissent s'écouler la solution alcoolique du suc à la vitesse recherchée de 1 goutte toutes les 2 secondes.

Préalablement, la résine livrée sous forme Na^+ est transformée en résine H^+ par passage de 100 cm³ de HCl 4 N, suivi de rinçage à l'eau distillée jusqu'à disparition de la réaction au NO_3Ag.

— Avant de passer les sucs, on verse 50 cm³ d'eau distillée à 0°C, puis les 25 cm³ de la solution alcoolique déprotéinisée ; l'effluent est recueilli dans une fiole jaugée de 100 cm³ ;

— de l'eau distillée à 0° est versée dans le réservoir jusqu'à ce que 100 cm³ soient recueillis (solution d'anions) ;

— une autre fiole de 100 est alors placée sous la colonne et on procède à l'élution des cations avec 50 cm³ de HCl 4 N, puis à l'eau distillée à 0° jusqu'à 100 cm³ (solution de cations).

Les deux solutions sont placées dans la glacière. Après un nouveau rinçage avec 500 cm³ d'eau distillée, la résine peut être employée à nouveau.

DOSAGE DES ANIONS

Dosage de NO_3^- + NO_2^-

Dans le cadre de la méthode proposée, le dosage de NO_3^- exclut l'emploi de techniques qui risqueraient d'oxyder d'autres substances azotées. Parmi les procédés les plus employés, nous avons expérimenté :

— Réduction en NH_3 et distillation suivie de titration. Ce procédé ne peut nous convenir pour les raisons suivantes :

- risque de décomposition par hydrolyse de l'asparagine et de la glutamine (HÉDIN et DUVAL, 1963) ;
- nécessité de disposer d'une quantité importante de matériel végétal.

— Dosage de NO_3^- suivant le procédé de A. GRANDVAL et H. LAJOUX, modifié en particulier par JOHNSON et ULRICH (1950), qui consiste en une colorimétrie avec l'acide phénol-disulfonique 2,4.

La méthode est précise mais exige la destruction de la matière organique et l'élimination de Cl^-. La stabilité est relativement faible et la sensibilité limitée à l'intervalle entre 5 et 60 γ. On ignore dans quelles proportions les nitrites ne seraient pas également dosés (K. PEACH et M. TRACAY, 1956). L'ion NH_4^+ gêne considérablement (A. N. LIEBEDIANTSEV, 1960).

— La méthode au 3,4 xylénol exige les mêmes traitements préalables : élimination de Cl^- et destruction de la matière organique.

L'application est longue.

L'emploi de la brucine oblige à manipuler un produit hautement toxique et un acide concentré. Les gammes obtenues ne sont pas reproductibles et l'origine des variations difficile à préciser, même si on utilise les techniques préconisées par BECKMAN (développement de la coloration à 30° et à l'obscurité).

Nous avons donné la préférence à la méthode classique indiquée par GRIESS : dosage de NO_3^- sous forme de NO_2^- après réduction, utilisée par LEMOIGNE (1937) et employée par de nombreux chercheurs. Nous l'avons adaptée à l'analyse des sucs végétaux et modifiée en utilisant pour la réduction le procédé inventé par GRAU et MIRNA (1957) en vue de l'analyse des extraits de viande, et en tenant compte des observations faites par M. J. FOLLET et P. W. RATCLIFF (1963) concernant le pH nécessaire à une réduction complète de NO_3^- en NO_2^-.

La réaction de GRIESS, basée sur la diazotation de l'acide sulfanilique, formation d'un colorant azoïque copulé sur l'α-naphtylamine, est spécifique des nitrites. Elle admet la présence de substances organiques et n'est gênée par aucun des ions normalement présents dans les sucs végétaux, à l'exception de CO_3^-, qui donne la même réaction mais ne trouble pas les résultats aux taux normalement rencontrés, alors que le Fe^{+++} qui pourrait également interférer se trouve en grande partie réduit à l'état de Fe^{++} lors de la réduction de NO_3^- par le procédé de GRAU et MIRNA.

Les reproches qui avaient été précédemment faits à la méthode de GRIESS portent sur une mauvaise reproductibilité et une stabilité insuffisante en cas d'application au dosage des nitrates. Ces inconvénients étaient dus à une réduction insuffisante et à l'action du Zn métallique, non éliminé, sur le réactif lui-même.

Nous avons obtenu des résultats constants, parfaitement reproductibles, présentant une excellente stabilité (1 h 30), en utilisant pour la réduction des colonnes renfermant du Zn traité au sulfate de cadmium, suivant GRAU et MIRNA, et en opérant à pH 9,5-9,6, suivant FOLLETT et RATCLIFF, alors que la coloration est développée dans un bain-marie à 30° pendant 15 minutes.

1. *Préparation des colonnes.*

100 g de Zn en aiguilles sont trempés dans 250 cm³ d'une solution à 20 p. 100 de sulfate de cadmium pendant 4 heures. On désagrège le Zn pris en masse pour séparer de la fraction spongieuse les aiguilles non attaquées. La partie spongieuse est transféré dans un broyeur-homogénéiseur et couverte avec HCl 1/5. Le broyage se fait en 2 ou 3 secondes.

On lave le matériau obtenu avec de l'eau distillée et on l'introduit dans les colonnes, dont on a préalablement réglé le débit à l'aide d'une quantité plus ou moins importante de coton de verre tassé avec un agitateur, l'eau distillée devant s'écouler à une vitesse d'environ 5 cm³ par minute.

2. *Réactifs.*

a) Solution de référence-mère, à 1 g de N par litre :
$NaNO_2$ = 4,927 g dans un litre d'eau distillée ;

b) Solution de travail : 25 cm³ de solution-mère + eau distillée, q.s.p. 1 litre ;

c) Réactif de GRIESS A : dans une fiole jaugée de 1 litre, on verse 250 cm³ d'acide acétique cristallisable, puis 3,3 g d'acide sulfanilique ; on fait dissoudre et on ajoute de l'eau distillée jusqu'au trait.

d) Réactif de GRIESS B : on fait bouillir pendant 15 minutes dans un bécher 100 cm³ d'eau dans laquelle on a ajouté 500 mg d'α-naphtylamine (ne pas s'inquiéter des bulles huileuses qui disparaissent après addition de l'acide acétique) ; on transfère dans une fiole jaugée de 1 litre et on ajoute 250 cm³ d'acide acétique cristallisable ; on complète au trait. Au moment de l'emploi, on mélange dans une éprouvette les réactifs A et B à parts égales.

e) Solution tampon, pH = 9,6-9,7 : dans une fiole jaugée, on introduit successivement

500 cm³ d'eau distillée,
20 cm³ d'HCl concentré et, après mélange,
50 cm³ d'ammoniaque concentré (D. 0,880).

On complète à 1 litre. Il est recommandé de contrôler le pH et ajuster au besoin avec HCl ou NH_4OH.

Pour le lavage des colonnes, on utilise la solution-tampon diluée dans la proportion de 1/9.

f) HCl à 0,1 M.

g) solution-tampon acétique, pH = 4,8 {
acétate de sodium ..... 100 g
acide acétique ..... 30 cm³
eau distillée, q.s.p. ..... 1 000 cm³

3. *Mode opératoire.*

Test préalable.

En premier lieu, on détermine approximativement les taux de N (NO_3^-), afin que dans les 5 cm³ de la prise la quantité d'azote nitrique soit comprise entre 100 et 500 γ.

Avant de procéder à la réduction, on verse sur les colonnes 25 cm³ d'eau distillée afin d'établir un courant régulier et chasser les bulles d'air qui ont pu s'introduire dans le Zn.

Dès que les réservoirs se trouvent vidés, on verse 25 cm³ de HCl à 0,1 p. 100.

Après écoulement, on rince avec 50 cm³ d'eau distillée.

Immédiatement avant d'introduire l'échantillon, on passe sur la colonne 25 cm³ de solution-tampon diluée (1/9).

La prise, contenue dans une fiole de 20 cm³, est constituée par 2 à 10 cm³ de solution d'anions (de sorte qu'elle renferme de 50 à 500 γ de N). On ajoute 5 cm³ de solution-tampon à 9,6 et de l'eau distillée jusqu'au trait. L'échantillon est versé sur la colonne, on laisse s'écouler 4 à 5 cm³ puis on recueille l'effluent dans une fiole jaugée de 100 cm³ contenant 50 cm³ de tampon acétique à 4,8. On lave la colonne jusqu'à ce que 100 cm³ soient recueillis.

Dosage.

On prélève 10 cm³, on les verse dans une fiole jaugée de 20 cm³ ; on prépare le mélange à parts égales de GRIESS A et B et on complète avec le réactif mélangé jusqu'au trait.

Dès que le réactif a été introduit dans tous les échantillons et dans la gamme, on les place pour 15 minutes dans un bain-marie à 30°.

La colorimétrie est effectuée à 4 750 Å, cuve de 1 cm (Jean et Constant), sensibilité 3, cellule antimoine.

La gamme de référence est constituée comme suit : dans des fioles jaugées de 100 cm³, on introduit : 0 — 1 — 2 — 3 — 4 cm³ de solution de référence 25 γ, puis 50 cm³ de solution-tampon acétique à 4,8. On ajuste à 100 cm³ avec de l'eau distillée et on mélange par retournement. On prélève 10 cm³ de chaque solution, que l'on verse dans des fioles de 20 ; on complète avec le réactif de GRIESS mélangé. La coloration est développée pendant 15 minutes au bain-marie à 30°.

La gamme comprend ainsi : 0 — 0,125 — 0,250 — 0,375 — 0,500 γ de N (NO_2^-) par cm³.

Dosage de l'ion phosphorique

Le dosage porte sur une partie aliquote de la solution d'anions.

Dans les sucs végétaux, le phosphore se trouve sous les formes suivantes :

minérale,
esters phosphoglucidiques,
nucléoprotéides et phosphoprotéides,
phytine,
lipides.

Dans le cadre des procédés employés, le phosphore lipidique est retenu par l'éther, le phosphore protéique et la phytine sont précipités par l'alcool ; il reste dans la solution d'anions le phosphore minéral et le phosphate glucidique. La séparation des deux formes est difficile, en raison de l'extrême labilité des liaisons phospho-glucidiques et il est possible qu'une partie de ce dernier soit dosée en même temps que le phosphore minéral.

En ce qui concerne l'interférence éventuelle des acides organiques dans le dosage, l'emploi du réactif molybdique en solution chlorhydrique nous met à l'abri de ce risque, grâce à l'importance de la dilution des sucs (1/80) que la sensibilité du réactif autorise.

Réactifs.

1. Solution étalon-mère (1 g de P par litre) = 4,393 g de PO_4H_2K dans un litre d'eau distillée. La solution de travail (5 γ de P par cm³) est réalisée en versant 5 cm³ de la solution-mère dans une fiole jaugée de 1 litre, complétée au trait avec de l'eau distillée ;

2. Réactif molybdique : 1 g de molybdate d'ammonium est dissous dans 20 cm³ d'eau distillée. On ajoute 20 cm³ HCl concentré ; on refroidit et on complète à 200 cm³ avec de l'eau distillée ;

3. Réducteur : solution de chlorure stanneux à 10 p. 100 dans du glycérol, à diluer au moment de l'emploi, 1 :/50.

Mode opératoire.

Dans des fioles jaugées de 20 cm³, on introduit successivement :

1 à 5 cm³ de la solution d'anions,
10 cm³ d'eau distillée,
4 cm³ de réactif molybdique,
1 cm³ de réducteur dilué 1 : 50. On complète au trait et on mélange par retournement.

La gamme de référence est composée de : 0 — 1 — 2 — 3 — 4 cm³ de solution étalon auxquels on ajoute les réactifs, comme il vient d'être décrit. Dix minutes après, on peut effectuer la colorimétrie à 8 500 Å, cellule au césium, sensibilité 5, cuve de 1 cm (colorimètre Jean et Constant).

Dosage de l'ion sulfurique

Le dosage du soufre minéral est effectué sur une partie aliquote de la solution d'anions par néphélométrie du SO_4Ba, maintenu en suspension par addition d'un tensio-actif qui est le *Tween 80* préconisé par LACHIA GARRIDA (1964). Préalablement, la solution est filtrée sur filtre sans pli N_4.

Réactifs.

1. Solution de référence à 50 mg de S par litre à partir de SO_4H_2 fixanal ;
2. Cl_2Ba = 10 g,
   eau distillée, q.s.p. 100 cm³.
   La solution de Cl_2Ba est ajoutée peu à peu, en agitant, à 15 cm³ de *Tween 80* ;
3. HCl N.

Mode opératoire.

Dans une fiole jaugée de 50 cm³, on verse successivement :

25 cm³ de la solution d'anions,
1 cm³ de HCl N ;
4 cm³ de réactif Cl_2Ba « tweené »,

on complète au trait.

En même temps, on prépare la gamme en versant : 0 — 1 — 2 — 3 — 4 cm³ de la solution de référence à 50 γ/cm³, puis les réactifs comme indiqué. On fait un témoin avec la solution d'anions non traitée.

Trente minutes après, on effectue les mesures en cuve de 4 cm, à 4 100 Å. sensibilité 5 (colorimètre Jean et Constant).

L'addition de HCl a pour but d'empêcher les acides moins forts de réagir avec le Ba. Un léger excès de HCl ne nuit pas.

Dosage de l'ion chlorhydrique

Nous utilisons pour le dosage de Cl^- la méthode Volhard modifiée par CALDWEL et MOYER (1935). A la solution à analyser, on ajoute un excès de NO_3Ag en milieu nitrique, on sépare par filtration le précipité de ClAg et on titre en retour avec le thiocyanate d'ammonium en présence d'alun ferrique.

L'acide nitrique empêche la formation de phosphate, oxalate et d'autres sels d'argent.

Réactifs.

1. Solution titrée de NO_3Ag N/50 :

NO_3Ag	3,397 g
eau distillée, q.s.p.	1 litre

2. Solution titrée de thiocyanate d'ammonium N/50 :

NH_4SCN	1,523 g
eau distillée, q.s.p	1 litre.

Une fois préparées, les deux solutions sont titrées l'une par l'autre. La correspondance des titres doit être fréquemment vérifiée.

3. Solution d'alun ferrique : à 100 cm³ de solution saturée, on ajoute 5 cm³ d'acide nitrique concentré ;

4. Acide nitrique dilué 1 : 3.

Mode opératoire.

Dans un bécher de 100, on introduit :

25 cm³ de la solution d'anions pure ;
2 cm³ de HNO_3 1 : 3 ;
10 cm³ de la solution de NO_3Ag.

On laisse une demi-heure au repos à l'obscurité, puis on filtre à travers un filtre serré n° 4 dans un bécher de 250 cm³.

Le filtre est lavé avec 5 cm³ d'acide nitrique dilué, puis on ajoute 5 cm³ de solution d'alun et on titre avec la solution de thiocyanate en opérant une agitation magnétique.

1 cm³ de NO_3Ag N/50 = 0,7092 mg Cl^-

Dosage des cations

Potassium et sodium

Ces dosages sont effectués par spectrophotométrie de flamme sur la solution chlorhydrique des cations. Nous utilisons le photomètre Électro-Synthèse F 62. Les concentrations de K^+ sont déterminées à l'aide de la raie de 7 665 Å et celles du sodium avec la raie de 5 896 Å.

Les anions étant éliminés, c'est l'interférence réciproque des deux ions monovalents qui est à craindre et plus particulièrement celle du K^+ sur le dosage de Na^+ par suite de la proportion dans laquelle ils se trouvent dans les sucs de la plupart des végétaux croissant en dehors des sols salins.

L'effet de cette interférence est réduit, sinon masqué, par l'emploi d'une solution de référence comprenant à la fois du potassium et du sodium dans un rapport de 10 : 1. Ainsi la gamme comprend :

0 — 25 — 50 — 75 — 100 γ/cm³ de K
0 — 2,5 — 5 — 7,5 — 10 γ/cm³ de Na

Les sucs bruts peuvent contenir de 1 000 à 10 000 mg de K et de 10 à 500 mg de Na. La solution de cations comporte une dilution de 1 : 20, ce qui fait qu'il n'est pas toujours possible d'effectuer les mesures sur une seule et même dilution.

Le sodium est dosé dans la même solution que le potassium (5 cm³ de la solution des cations dans 50 cm³).

Dosage du calcium

Nous dosons le Ca^{++} par complexométrie en présence de Glyoxal *bis* (2 hydroxyanil) ou GB HA, dont la formule brute est $C_{14}H_{12}O_2N_2$. Ce réactif a été indiqué par Bayer (1960) comme étant spécifique de l'uranium et du calcium.

Le GBHA forme avec Ca^{++} un complexe rose vif, qui est détruit par l'EDTA. A la fin de la réaction, le passage du rose au jaune citron est si net qu'il est possible d'employer l'EDTA N/400 (1 cm³ = 50 γ de Ca^{++}).

Nous avons cependant constaté que le réactif n'était pas absolument insensible au Mg^{++}. En ajoutant à 200 γ de Ca^{++} des quantités croissantes de Mg^{++}, nous avons obtenu les résultats suivants :

	virage obtenu avec 3,95 cm³ EDTA				
200 γ Ca^{++}					
200 γ Ca^{++} + 50 γ Mg^{++}	—	—	—	3,95	—
200 γ Ca^{++} + 100 γ Mg^{++}	—	—	—	3,95	—
200 γ Ca^{++} + 200 γ Mg^{++}	—	—	—	4,05	—

L'interférence observée (+ 1,25 p. 100) paraît acceptable ; elle concerne des taux de Mg^{++} et de Ca^{++} voisins, comme c'est le cas dans les sucs du maïs.

Réactifs.

Glyoxal-*bis*, en solution à 0,02 p. 100 dans alcool méthylique ;
Cyanure de potassium à 0,5 p. 100 ;
NaOH N ;
EDTA N/200.

Le dosage porte sur 20 à 40 cm³ de solution chlorhydrique des cations, additionnée de 0,5 cm³ de H_2O_2 que l'on amène à sec au bain de sable et que l'on redissout dans 40 cm³ d'eau distillée (correspondant à 1 ou 2 cm³ de suc brut).

On ajoute ensuite :

1 cm³ de cyanure de K à 0,5 p. 100,
4 cm³ de NaOH N,
5 cm³ de glyoxal à 0,02 p. 100.

On introduit un agitateur magnétique et on titre lentement avec EDTA N/200.

1 cm³ de EDTA N/200 correspond à 0,100 mg de Ca.

Dosage du magnésium

La possibilité de doser le Ca^{++} avec une précision satisfaisante grâce au GBHA nous a fait abandonner le dosage du Mg^{++} à l'aide du jaune de thiazol que nous utilisions auparavant.

Les avantages des méthodes complexométriques sont bien connus mais, jusqu'à présent, la versatilité et la difficulté du dosage de Ca^{++} par la Murexide rendaient imprécis le dosage de Mg effectué indirectement par différence entre la somme $Ca^{++} + Mg^{++}$ et le taux de Ca^{++} (R. MAZOYER, 1954).

Nous dosons Ca + Mg par la technique R. MAZOYER (1958), en présence de phtaléine complexone et de Vert de naphtol comme indicateur, le fer, l'aluminium et le manganèse étant masqués par la triéthanolamine et le cuivre, le zinc et le cobalt étant de leur côté complexés par le cyanure de potassium (DIEHL, 1950).

Le pH, qu'il est essentiel de fixer à 10,1, est maintenu par l'emploi d'un tampon $ClNH_4$-ammoniaque :

67,5 g $ClNH_4$ dans 200 cm³ d'eau distillée
570 cm³ d'ammoniaque pur, complétés à 1 litre.

L'indicateur est composé comme suit :

20 g de $ClNH_4$;
100 mg d'acide xylénylphtaléine-*bis*-iminodiacétique ;
75 mg de Vert de naphtol ;

le mélange est trituré au mortier jusqu'à former une poudre homogène.

Le dosage porte sur 20 cm³ de solution des cations additionnée de 0,5 cm³ de H_2O_2, amenée à sec au bain de sable et redissoute dans 40 cm³ d'eau distillée. Il est effectué par titration avec une solution d'EDTA N/200.

Nous opérons comme suit :

Dans un bécher de 250 cm³ contenant la solution à doser on ajoute :

1 cm³ de CNK à 0,5 p. 100 dans eau distillée,
2 cm³ de triéthanolamine au 1/3,
4 cm³ de tampon pH 10,1,
100 mg de poudre d'indicateur ;

on opère une agitation magnétique lente et on titre avec une solution d'EDTA N/200 ou N/100.

1 cm³ d'EDTA N/200 correspond à 60,8 γ de Mg.

Dosage de l'ammonium

Le dosage de NH_4^+ est la détermination la plus délicate parmi celles que prévoit la méthode.

Les sucs végétaux contiennent normalement de 10 à 25 mg de N (NH_4^+) par litre. Ce taux peut être réduit à l'état de traces ou s'élever jusqu'à 200 ou 250 mg/l, des taux supérieurs ne se rencontrant que dans les plantes en état avancé de dépérissement.

Nous avons expérimenté la plupart des procédés de dosage de NH_4^+ et avons constaté que seule la sensibilité du réactif de Nessler permet d'atteindre une précision suffisante dans le cas des sucs.

L'épuration et le fractionnement permettent d'éliminer la plupart des substances susceptibles de gêner la réaction de Nessler mais il reste dans la solution de cations : l'acide glutamique, l'arginine, la cystéine, la leucine et le tryptophane.

En procédant à une distillation sous pression réduite, suivant JOVANOVITCH, on obtient un distillat débarrassé de toute substance susceptible d'intervenir. Cependant, de très nombreux dosages opérés : d'une part, directement sur la solution de cations et, de l'autre, sur le distillat, nous ont donné des résultats similaires et nous considérons que, sauf le cas où l'addition du réactif de Nessler à la solution de cations provoque un trouble (présence des substances énumérées sauf leucine), on peut se dispenser de la distillation (L. L. CHTCHETININA et V. A. BOUTENKO, 1957).

Réactifs.

a) Citrate de sodium ..... 80 g.
Na OH en pastilles ..... 26 g.
H_2O distillée q. s. p. ..... 1. 000 cm³

(La soude est préalablement dissoute dans 500 cm³ d'eau distillée et portée à ébullition pendant 5 minutes)

b) Gomme arabique à 5 %

La solution de gomme à 5 p. 100 est passée à travers une colonne de résine cationique (Dowex 50). On ajoute 2 à 3 gouttes de chloroforme et on la conserve au réfrigérateur. Au moment de l'emploi, on mélange les réactifs *a* et *b* dans la proportion de 95 : 5.

c) Nessler A : 45,5 g d'iodure mercurique
36,5 g d'iodure de potassium

Les deux sels sont triturés au mortier, en ajoutant peu à peu de l'eau distillée. On transvase le mélange ainsi obtenu dans une fiole jaugée de 1 000 et on complète au trait avec de l'eau distillée. Il se dépose normalement au fond de la fiole quelques grains d'iodure mercurique en excès ; il y a intérêt à les séparer au moment où on transvase le réactif dans une fiole en verre teinté et bouchée à l'émeri, dans laquelle il sera conservé par la suite.

Nessler B : 112 g de KOH en pastilles,
eau distillée, q.s.p. 1 000 cm³

(faire bouillir et compléter). Au moment de l'emploi, on mélange le Nessler A et le Nessler B à parts égales.

d) Solutions de référence.

— Solution-mère : 4,716 g de sulfate d'ammonium sont dissous dans une fiole jaugée de 1 litre et complétés au trait avec de l'eau distillée exempte d'ammonium ; la solution contient 1 g de N (NH_4^+) par litre.
— Solution de travail : 10 cm³ de solution-mère sont versés dans une fiole jaugée de 1 litre et complétés au trait. Cette solution contient 10 γ de N (NH_4^+) par cm³.

Mode opératoire.

Dans une fiole jaugée de 20 cm³, on introduit successivement : 1 à 5 cm³ de solution, 10 cm³ du réactif mixte (*a* et *b*), 1 cm³ du réactif de Nessler (A + B) et on complète au trait avec de l'eau distillée. On mélange soigneusement et on attend 20 à 25 minutes pour colorimétrer. La température de la solution au moment de l'addition du réactif de Nessler et pendant le développement de la coloration doit être voisine de 25°.
La gamme est constituée en même temps, à l'aide de la solution de référence de travail à 10 γ/cm³, ce qui fait qu'on a : 0 — 0,5 — 1 — 1,5 — 2 γ/cm³ d'azote ammoniacal. On ajoute les réactifs de la même façon que pour l'échantillon.
Colorimétrie : 4 250 Å avec le colorimètre Jean et Constant, cellule à antimoine, sensibilité 4, cuve de 2 cm.

Dosage de l'azote organique

Les teneurs en azote organique sont établies, soit par différence entre l'azote total contenu dans le suc minéralisé et les quantités d'azote minéral ($NH_4^+ + NO_3^-$) préalablement déterminées, soit en appréciant l'importance des fractions : protéique dans le culot de déprotéinisation, aminée et amidée dans la solution des cations.
Quel que soit le matériau analysé, le dosage final est invariablement réalisé par colorimétrie de NH_4^+, à l'aide de la réaction de Nessler.

Minéralisation des sucs bruts

Nous avons expérimenté les méthodes de minéralisation suivantes :

— *Méthode au perhydrol* Jaeger (1950), G. Ducet (1951), J. Chouteau (1960). Dans le cas des sucs végétaux particulièrement riches en nitrates, les résultats sont peu satisfaisants ; les quantités d'azote ainsi déterminées sont inférieures à la somme des fractions appréciées indépendamment.
— *Méthode utilisant l'acide salicylique* (A. Brunel, 1954) et $S_2O_3Na_2$ joint à l'action de H_2SO_4 et de H_2O_2 (D. M. Ekpete et Cornfield, 1964). — Ces modifications apportent une amélioration certaine à la technique précédente mais les pertes d'azote peuvent encore atteindre 15 à 20 p. 100.

Nous avons remarqué que ces pertes se produisaient chaque fois que des taux importants de NO_3^- étaient associés aux teneurs élevées en acides aminés et avons émis l'hypothèse suivant laquelle elles se produisaient sous la forme de N_2 à la suite de la réaction de VAN SLYKE suivant la formule :

$$R - \underset{\displaystyle NH_2}{\overset{\displaystyle |}{CH}} - COOH + NOOH \rightarrow R - CHOH - COOH + N_2 + H_2O$$

Pour éviter cette réaction, nous avons bloqué les radicaux aminés en formant le dérivé méthylénique de Sörensen par addition de formol :

$$R - \underset{\displaystyle NH_2}{\overset{\displaystyle |}{CH}} - COOH + HCOH \rightarrow R - \underset{\displaystyle N = CH_2}{\overset{\displaystyle |}{CH}} - COOH + H_2O$$

Les fonctions aminées étant masquées, la réduction de NO_3^- en NH_4^+ peut s'opérer sans pertes.

Effectivement, les quantités d'azote ainsi déterminées s'avèrent significativement supérieures à celles obtenues à l'aide des techniques précédentes.

Le tableau 7 reproduit un exemple de résultats fournis par les trois types de minéralisation réalisés après 6 répétitions sur 1 cm³ de suc contenant :

$N(NH_4^+)$	0,067 g/litre
$N(NO_3^-)$	0,542 —
N (aminé + amidé)	0,412 —
N protéique	0,073 —
Total	1,094 g/litre

TABLEAU 7

Effet de la méthode de minéralisation employée sur la teneur en azote total déterminée dans 1 cm³ de suc

Méthodes	Glusose + H_2SO_4 + H_2O_2	H_2SO_4 + ac. salicyl. + $S_2O_3Na_2$ + H_2O_2	Précédente + HCOH
Répétitions			
N en mg/cm³	0,780	0,864	1,056
»	0,795	0,836	1,056
»	0,790	0,892	1,046
»	0,800	0,902	1,037
»	0,795	0,883	1,046
»	0,810	0,883	1,046
Moyenne de 6 répétitions	0,795	0,876	1,048
Pertes par rapport à la somme des fractions	0,299	0,218	0,046

On constate que les résultats fournis par chaque type de minéralisation sont relativement constants et significativement différents les uns des autres. Les indices obtenus par le procédé comprenant le blocage des fractions aminées par le formol se rapprochent le plus de la somme des fractions appréciées indépendamment.

Il apparaît toutefois que la minéralisation des sucs bruts n'offre pas une sécurité suffisante, notamment en raison des variations importantes de leur composition d'un échantillon à l'autre, alors que la technique employée doit être adaptée à cette composition.

Dans ces conditions, il semble que l'appréciation globale de la teneur en azote sur suc brut minéralisé n'offrirait d'intérêt que dans les cas où on ne procéderait pas à la détermination séparée des fractions aminée, amidée et protéique (Schéma A). La somme des fractions ajoutée aux teneurs

en azote minéral $N(NO_3^-)$ + $N(NH_4^+)$, renseigne sur le contenu en azote total du suc avec une certitude supérieure (Schéma B).

Le procédé de minéralisation des sucs bruts que nous avons retenu comme donnant les meilleurs résultats est le suivant :

Mode opératoire.

Dans un matras de 30 cm³, on verse :

Suc brut filtré	1 cm³
HCOH dilué 1 : 1	1 cm³

On plonge le matras dans un bain de glace et on ajoute :

H_2SO_4 (à 3 p. 100 d'acide salicylique pour toxicologie)	2 cm³.

On attend 30 minutes, puis on introduit directement dans la solution à l'aide d'un tube,

Thiosulfate de sodium à 5 H_2O	200 mg.

On agite pour dissoudre et on attend 15 minutes avant de placer le matras sur la rampe de minéralisation. Le chauffage est conduit progressivement, de façon à atteindre 200° au bout d'une heure.

Cette température est maintenue pendant 2 heures, après quoi on ajoute :

H_2SO_4 concentré	2 cm³

en faisant descendre toutes les particules charbonneuses qui ont pu se fixer sur les parois.

On poursuit la minéralisation jusqu'à ce que le liquide passe du brun noir au brun clair et qu'il n'adhère plus aux parois du matras. On laisse refroidir et on ajoute 1 goutte de H_2O_2 à 110 vol. Electro (pipette à 20 gouttes par cm³).

On chauffe 10 minutes à 80-100°C, puis 10 minutes à 200°C. Si le minéralisat n'est pas devenu parfaitement incolore et limpide, on refroidit et on ajoute une nouvelle goutte de H_2O_2, puis on chauffe comme précédemment.

Si l'attaque a été bien conduite, 2 gouttes suffisent généralement ; sinon, on répète l'addition de H_2O_2 jusqu'au résultat recherché.

Dans le cas de sucs particulièrement riches en $N(NO_3^-)$, on est amené à augmenter la dose de H_2SO_4/acide salicylique et de thiosulfate de sodium. Les quantités de H_2O_2 à ajouter augmentent également dans ce cas.

Lorsque la liqueur minéralisée est devenue incolore et translucide, on élève la température à 300°C pendant 1/2 heure (ébullition). On refroidit et on ajoute 2 cm³ d'eau distillée, que l'on évapore à basse température (– 100, – 120°C), ces dernières opérations ayant pour but de détruire les traces de H_2O_2 qui gêneraient lors du dosage du phosphore, effectué sur une partie aliquote de ce même minéralisat.

On effectue une minéralisation à blanc (témoin).

La minéralisation étant terminée, on transfère la solution dans une fiole jaugée de 20 et on complète au trait avec les eaux de lavage du matras.

Le dosage de l'azote est réalisé sur cette liqueur, neutralisée par NaOH 10 N, à l'aide du réactif de Nessler comme il a été décrit au chapitre traitant du dosage de NH_4^+.

Dosage de l'azote cationique

La totalité de l'azote NH_4^+ aminé et amidé se retrouve dans la solution chlorhydrique des cations. Pour la minéralisation, on verse 10 cm³ de cette solution dans un matras de 30 et on porte à ébullition. Lorsque les 3/4 sont évaporés, on ajoute 2 cm³ de H_2SO_4 et on chauffe à ébullition, jusqu'à décoloration complète. On continue encore pendant 1 heure, puis on traite l'échantillon comme dans le cas du suc brut.

Dosage de l'azote protéique

La minéralisation de l'azote protéique et le dosage sont réalisés de la même façon : le culot de déprotéinisation est repris par 10 cm³ de H_2SO_4 N/10 et transféré dans un matras de 30 cm³. On évapore les 3/4 et on ajoute 2 cm³ de H_2SO_4 concentré. La minéralisation est poursuivie à 200°C, jusqu'à ce que la liqueur ne garde plus qu'une légère teinte jaune. On ajoute, après refroidissement, 1 goutte de H_2O_2 et on chauffe progressivement jusqu'à 300°C. Après destruction de l'eau oxygénée, le minéralisat est transféré dans une fiole de 50 cm³ et le dosage est réalisé par le Nessler sur une prise de 1 ou 2 cm³.

Dosage du phosphore organique

Comme dans le cas de l'azote, le phosphore organique est dosé, soit par différence entre la teneur globale et la fraction minérale contenues dans le suc, soit en appréciant séparément les valeurs des différentes fractions.

Dans le premier cas, le dosage porte sur 1 à 5 cm³ de minéralisat du suc brut (A), que l'on introduit dans une fiole jaugée de 20 cm³. On neutralise en présence de β-dinitrophénol, avec NaOH N, jusqu'à l'apparition d'une légère teinte jaune. On note pour chaque échantillon le nombre de gouttes utilisées, car on procédera de même lors du dosage de l'azote total mais, en ce cas, sans ajouter l'indicateur. Le dosage proprement dit est effectué de la façon décrite au chapitre traitant du dosage de $PO_4H_2^-$.

L'acide sulfurique, même celui destiné aux dosages toxicologiques, contient toujours des traces de P ; il est par suite nécessaire de tenir compte de la densité optique du « blanc de minéralisation ».

Dosage du phosphore glucidique

Le phosphore minéral et le phosphore glucidique se trouvent réunis dans la solution des anions. La séparation des deux formes présente des difficultés et ne semble offrir qu'un intérêt relatif du point de vue du diagnostic. L'extrême labilité des liaisons glucidiques prive les indices que l'on peut relever d'une grande partie de leur signification vis-à-vis des conditions de l'alimentation phosphorique des plantes.

On minéralise 2 à 5 cm³ de la solution d'anions en présence de 1 cm³ de H_2SO_4 et de H_2O_2 suivant le procédé décrit.

Dosage du phosphore protéique

Ce dosage est effectué sur une prise de 0,5 à 1 cm³ de minéralisat de protéines de façon identique.

Dosage du soufre organique

Le soufre organique contenu dans les sucs végétaux se trouve principalement sous forme d'acides aminés soufrés : cystine, cystéine, méthionine, glutathion, libres ou liés dans les molécules protéiques et sous forme de composés phosphorés.

La teneur en soufre organique est établie par différence entre le soufre total et la fraction restant sous la forme de SO_4^{--}. On oxyde généralement les composés organiques soufrés à l'aide de perhydrol ou par fusion alcaline. Ces procédés sont longs et il n'est pas certain qu'une partie de S ne soit perdue sous forme de SO_2 ou de SO_3.

Pour ces raisons, nous avons mis au point un procédé d'oxydation basé sur l'emploi du chlorate de potassium utilisé déjà par GIBSON (1950), mais auquel R. C. AIDINIAN (1957) a trouvé, en vue de l'analyse des sols, une application particulièrement séduisante par sa simplicité, sa précision et la reproductibilité des résultats.

Mode opératoire.

Dans un tube en quartz (200 × 20 mm), on introduit 5 g de sable de Norvège préalablement trempé dans HCl N, calciné à 1 000°C pendant 6 heures, lavé à l'eau distillée et séché à l'étuve. Sur ce sable, on verse 1 cm³ de suc brut additionné de 2 cm³ d'eau distillée et d'une goutte de H_2O_2. On évapore à sec dans une étuve à 50°C. Le sable est alors désagrégé et mélangé avec :

ClO_3K ..... 2 g
MnO_2 ..... 50 mg

On aboutit ainsi à une très grande division du soufre et à un mélange intime avec l'oxydant et le catalyseur.

Le tube de quartz est alors fixé dans une position inclinée sur un support, à l'aide d'une pince, et raccordé au moyen d'un tube en verre coudé à un second tube de 200 × 20, en pyrex, fixé dans une position voisine de la verticale. Dans ce tube, on a versé 20 cm³ d'eau distillée additionnés de 2 gouttes de H_2O_2.

Le raccord venant du tube en quartz plonge dans cette eau. Les gaz qui s'en échapperont sortiront, après barbotage, par une ouverture ménagée dans le bouchon, abandonnant dans l'eau le SO_3 qu'ils pourraient contenir.

Le montage réalisé, on chauffe à l'aide d'un bec Bunsen l'extrémité du tube contenant l'échan-

tillon, en suivant l'intensité du dégagement de O_2. On pousse le chauffage jusqu'à 650-750°C (rouge cerise) et on déplace lentement la flamme en sorte que tout le contenu du tube atteigne cette température. Lorsque le dégagement de O_2 est terminé, on débranche tout d'abord le tube contenant l'eau pour éviter son aspiration et on arrête le chauffage.

L'opération complète ne demande que 15 minutes environ. Après refroidissement, on lave le contenu du tube avec 25 cm³ de KCl 0,1 N et on filtre la solution dans une fiole jaugée de 50 cm³ à travers un filtre serré. On y ajoute l'eau du tube Pyrex pouvant contenir le soufre capté sous forme de SO_3 ; on ajoute :

HCl N	1 cm³
réactif Cl_2Ba tweené	4 cm³

On complète au trait et on effectue les mesures, comme il a été indiqué à propos du dosag de SO_4^{--}.

Nous avons contrôlé la méthode en soumettant à ces opérations une gamme de référence constituée à l'aide de SO_4H_2 fixanal et une gamme de même concentration en S réalisée à partir de la méthionine. A titre d'exemple, nous reproduisons les résultats obtenus :

S calculé (dans la fiole de 20 cm³)	S mesuré (gamme SO_4H_2)	S mesuré (gamme méthionine)
100 γ	98	95
200 γ	208	204
300 γ	306	284
400 γ	404	399

On constate que, dans les deux cas, la précision obtenue est de l'ordre de 5 p. 100.

TROISIÈME PARTIE

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

I. Caractères et étendue des informations qui peuvent être procurées par l'analyse

La composition chimique d'un tissu végétal est déterminée par un grand nombre de facteurs susceptibles d'intervenir de façon à aggraver ou à masquer l'effet spécifique de chacun d'eux.

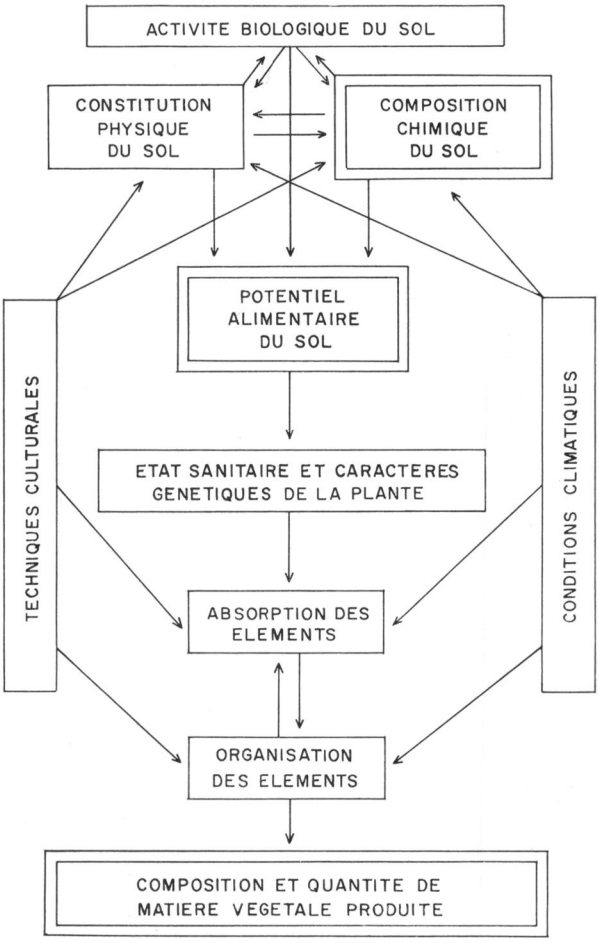
La représentation schématique de l'interdépendance des principaux groupes de facteurs des milieux externe et interne figurant au tableau 8 donne une idée de la difficulté qu'il y aurait à définir la part qui revient à chacun d'eux dans l'élaboration du statut minéral de la plante si cette détermination devait être fondée sur l'analyse du végétal, à l'exclusion de toute autre source d'information.

On constate que les difficultés auxquelles on peut se heurter proviennent non seulement du nombre de paramètres à considérer mais aussi de la nécessité de disposer d'une masse considérable d'informations extra-analytiques, dont certaines ne peuvent être exprimées en des termes tels qu'ils puissent être rapprochés des

indices relatifs à la composition chimique de la plante. Par conséquent, il serait vain d'espérer trouver dans les résultats analytiques la totalité des éléments permettant d'établir un jugement de valeur se rapportant au milieu ou autorisant un pronostic concernant les récoltes.

TABLEAU 8

Schéma de l'interaction et de l'interdépendance des facteurs de la nutrition minérale



Dans le cas d'expérimentation conduite en milieu contrôlé, il est facile de définir, *a posteriori*, la relation s'établissant entre le milieu, la plante et le rendement mais il n'en est pas de même quand il s'agit d'apprécier la nutrition des plantes dans les conditions de la production ou de résoudre les problèmes posés par des cas cliniques, en raison de l'insuffisance des données relatives au milieu.

Nous estimons que, dans de telles conditions, les informations qui peuvent être demandées à l'analyse du végétal doivent être limitées à la définition du niveau et de l'équilibre de la nutrition, établie par rapport à une base physiologique indépendante du milieu.

Même ainsi limitée dans ses objectifs, l'analyse de la plante conserve un rôle primordial, car la recherche des causes des troubles de la nutrition des plantes portant exclusivement sur le milieu constitue, suivant LUNDEGARDH, un « travail de Sisyphe » mais il n'en est plus de même lorsque la nature des troubles a été mise en évidence. Il suffit alors de vérifier, par des moyens appropriés, les hypothèses que l'analyse de la plante aura permis de formuler.

Il en résulte que les conditions d'emploi de la méthode commandent, dans une certaine mesure, l'étendue des informations qui pourront être recueillies et la démarche qui présidera à l'interprétation des résultats.

II. MARCHE A SUIVRE AU COURS DE L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La figure 1 représente un modèle de bulletin d'analyse.

Le bulletin comporte en premier lieu l'indication relative à l'indice de développement et, à la suite, les résultats des différentes déterminations portant sur la composition chimique de la plante.

a) *Indice de développement* (1)

On considère tout d'abord la valeur de cet indice, car elle est susceptible de modifier la signification des taux de l'ensemble des constituants chimiques des sucs.

De nombreux travaux réalisés au cours des dernières années ont mis en évidence l'étroite relation qui existe entre la surface foliaire et les rendements lorsque les conditions de milieu sont favorables. C'est ainsi que A. A. KORNILOV et V. S. KOSTINA (1965) établissent cette relation dans le cas du pois (*Pisum sativum* L.), rapports que nous reproduisons ci-dessous :

Rendements (grains en q/ha)	Surface foliaire (en milliers de m²/ha)
10,5	34,9
18,0	51,2
21,0	58,8
21,2	60,7
24,9	78,5
28,7	80,6

De leur côté, à la suite de nombreuses expériences, E. KALJU et J. HANWAY (1966) constatent qu'une relation linéaire unit le poids de matière sèche produite par un pied de maïs à l'étendue de sa surface foliaire.

Nous reproduisons ci-dessous un exemple de nos propres observations se rap-

(1) Celui-ci est constitué par le poids de matière fraîche de l'organe assimilateur, alimenté par le tissu conducteur analysé.

I. N. R. A.
Station d'agronomie du C. R. A. S. O.,
33 - Pont-de-la-Maye (Gironde)

Diagnostic de la Nutrition des Plantes

Échantillons prélevés le.....
provenant de.....
.....
Espèce et variété .....
Organe de référence .....

Bulletin d'analyse n°

Référence des échantillons Ind. de développement								
Éléments	mg/l	méq./l	mg/l	méq./l	mg/l	méq./l	mg/l	méq./l
Azote NO_3^-								
— NH_4^+								
— aminé + amidé.....								
— protéique								
Azote soluble total.....								
Phosphore $PO_4H_2^-$								
— glucidique.....								
— protéique								
Phosphore soluble total								
Soufre SO_4^{--}								
Soufre soluble total								
Chlore Cl^-								
Σ des anions								
Nm % N. S. T.								
Pm % P. S. T								
Sm % S. S. T								
N. S. T./P. S. T.								
P. S. T./S. S. T.								
K								
Ca								
Mg								
Na.....								
Σ des cations								
K^+ % Σ cations								
Ca^{++} % Σ cations								
Mg^{++} % Σ cations								
Na^+ % Σ cations								
NH_4^+ % Σ cations								
Ca précipité par alcool.....								

Fig. 1

portant au maïs *Funk's G 75*, planté à 40 000 pieds/ha. Il s'agit d'un dispositif expérimental de fertilisation établi sur deux types de sols différents mais suivant le même protocole.

I. Dispositif Sourbès, à Gaillères (Landes), 1966

Traitement n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rendements en grain sec ...	47,2	42,4	42,4	63,2	40	64	56,8	50,4	53,6
Indices de développement (poids de 10 feuilles).....	28,87	24,90	25,25	32,85	16,37	34,37	30,96	25,25	29,80

II. Dispositif Gauzer, à Cauna, 1966

Traitement n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rendements en grain sec ..	76,6	77	80	80	80	80,2	81	81,3	83,1
Indices de développement (poids de 10 feuilles).....	33,37	32,16	33,37	33,42	34,25	34,62	34,67	34,97	35,50

Il y a lieu de préciser que, dans le cadre de la méthode proposée, nous ne cherchons pas à établir un rapport mathématique entre la surface foliaire, les rendements et la composition chimique des sucs, bien qu'une telle relation puisse exister pour un génotype et un type d'alimentation donnés. Nous désirons seulement acquérir l'assurance de ne pas nous trouver en présence de plantes anormales, dont la croissance serait considérablement réduite ou particulièrement importante pour des raisons qui peuvent ne pas être alimentaires. C'est ainsi qu'une structure ou une réaction défavorable du sol, ou encore un régime mal approprié de l'alimentation en eau, peuvent déterminer une réduction importante du développement, même si les plantes reçoivent une alimentation minérale suffisante et équilibrée. Dans de tels cas, les rapports N p. 100 N. S. T., P p. 100 P. S. T., S p. 100 S. S. T., sont particulièrement élevés ; on pourrait alors conclure à une alimentation intense en ces éléments si l'indice de croissance ne subissait pas une réduction corrélative.

Inversement, pendant la période végétative, des plantes bien alimentées bénéficiant de conditions optimales de température, d'éclairement et d'alimentation en eau peuvent prendre, à un moment donné, un développement tel que le phénomène de dilution entre en jeu et les taux de l'ensemble des éléments se trouvent abaissés au-dessous des teneurs qui correspondraient au niveau de l'alimentation. La réduction des taux affectera en premier lieu la fraction minérale des éléments métaboliques. Dans un premier temps, les rapports N p. 100 N. S. T., P p. 100 P. S. T., S p. 100 S. S. T seront particulièrement bas. Mais, si la situation exceptionnellement favorable au développement se prolonge, les rapports précités tendront à retrouver leurs valeurs normales par suite de l'utilisation, pour la construction de tissus et d'organes nouveaux, des formes intermédiaires métabolisées.

Dans ce cas, les différentes formes de l'azote successivement atteintes par la baisse des taux se classent dans l'ordre suivant :

$$N\ (NH^{+}_{4}) \rightarrow N\ (NO^{-}_{3}) \rightarrow N \text{ amidé} \rightarrow N \text{ aminé} \rightarrow N \text{ protéique}$$

Si les taux de l'ensemble des substances azotées sont bas, on ne peut se trouver qu'en présence de deux cas :

— déficience prononcée de l'alimentation azotée = indice de développement bas ;

— persistance des conditions exceptionnellement favorables au développement = indice de développement élevé.

Dans le premier cas, les éléments autres que l'azote se trouvent à un niveau élevé ; dans le second, l'ensemble des niveaux des éléments métaboliques est réduit. La valeur des indices de développement dans chacun des deux cas ne laisse subsister aucun doute.

C'est ainsi que pour les maïs hybrides à grand développement tels que *Iowa 44.17* ou *Funk's GS 75*, plantés à 45 000 pieds/ha, les seuils au-delà desquels les phénomènes de dilution ou de concentration sont à craindre peuvent se situer, au stade de l'apparition de la floraison mâle, à :

— concentration, indice de développement < 15 ;
— dilution, indice de développement > 35.

Les valeurs de référence indiquées se rapportent exclusivement au stade de l'apparition de l'inflorescence mâle ; nous ne possédons pas encore un nombre suffisant de résultats pour fixer celles qui pourraient être utilisées aux stades antérieurs.

Dans le cadre de l'expérimentation agronomique, l'absence de référence ne présente pas un inconvénient majeur en raison de la possibilité que l'on a de procéder par comparaison des taux relevés sur les témoins et sur des plantes recevant les différents traitements.

Pour établir un diagnostic en culture, la connaissance des indices de référence applicables à tous les stades serait particulièrement utile bien que l'on puisse dans la majorité des cas procéder aussi par comparaison entre plantes normales et plantes déprimées d'un même champ.

La façon dont les résultats analytiques sont exploités, au sein des différentes méthodes de diagnostic, repose sur le choix d'un niveau de référence qui correspond à une situation alimentaire caractérisée, telle que : l'apparition des symptômes de déficience, ou l'absence de réponse à l'augmentation des apports de l'élément en cause, ou encore sur un équilibre considéré comme optimal entre certains éléments.

Nous avons insisté sur les inconvénients qui peuvent résulter de l'application de telles normes aux indices se rapportant soit à la masse globale des éléments contenus dans un tissu assimilateur, soit à la seule fraction minérale déterminée dans des extraits d'organes conducteurs.

Ces inconvénients disparaissent dès l'instant où on détermine indépendamment la valeur des différentes formes sous lesquelles les éléments absorbés sont présents dans la plante et que le critère final d'appréciation repose sur une base physiologique susceptible d'intégrer, dans chaque cas particulier, les effets de l'ensemble des conditions du milieu.

En nous basant sur des expériences conduites en milieu contrôlé, ainsi que sur un grand nombre de diagnostics portant sur des plantes cultivées par les agricul-

teurs, nous avons établi des normes d'interprétation qui gagneraient, certes, à être précisées davantage mais dont l'application nous a jusqu'à présent donné satisfaction.

Le tableau 9 reproduit les valeurs optimales des indices applicables dans le cas des maïs demi-tardifs, Gr. III, tels que *Iowa 44.17, Funk's G 34,* plantés à raison de 45 000 à 50 000 pieds/ha, l'échantillonnage étant effectué dans les 48 heures qui suivent l'apparition de l'inflorescence mâle. Les sucs analysés sont extraits de 10 demi-

TABLEAU 9

Normes d'interprétation (provisoires)

Valeurs optimales (V. O.) des principaux indices
Nutrition minérale de *Zea Mays.* Stade de la floraison mâle
Iowa 44 17, rendement 70-80 q./ha

Indices	Valeur optimale	
	mg/l	méq/l
Indice de développement, I.D.	25-35 g	/
Azote NH_4^+	15-30	1-2
— NO_3^-	500-800	35-60
— minéral (Nm)	500-800	35-60
— aminé + amidé (Nam)	150-500	
— protéique Np)	150-200	
— soluble total (NST)	850-1 600	
Nm % NST (indice métabolique N)	40-60 %	
Phosphore minéral (Pm)	40-60	1,2-2 ($PO_4H_2^-$)
— « glucidique » (Pg)	50-100	
— protéique (Pp)	80-100	
— soluble total (PST)	180-280	
Pm % PST (indice métabolique P)	20-25 %	
NST/PST	5-6	
Soufre minéral (Sm)	30-50	1-2 ($SO_4^=$)
Soufre total (SST)	60-150	
Sm % SST (indice métabolique S)	30-50 %	
PST/SST	1,5-2,5	
Cl^-	< 1 500	< 40
Cl^-/NO_3^-	< 2,5	
Somme des anions (Σ A)		75-110
NO_3^- % Σ A		40-55 %
Potassium	2 500-3 500	65-90
Calcium Ca^{++}	250-300	12-15
— (Ca pp par alcool	300-400	
Magnésium	250-350	20-30
Sodium	< 100	< 4
Somme des cations (Σ C)		100-150
Σ C/Σ A		1,20-1,50
K^+ % Σ C		60-70 %
Ca^{++} % Σ C		20-25 %
Mg^{++} % Σ C		8-10 %
Na^+ % Σ C		1-2,5 %
NH_4^+ % Σ C		1-2 %
K/Mg (rapport pondéral)	8-10	
K/Nm (rapport pondéral)	4-5	

nervures de la sixième feuille, les indices de développement étant établis de leur côté sur les 10 limbes des mêmes feuilles.

Ces normes ne sont indiquées qu'à titre d'exemple et doivent être considérées comme provisoires car établies à la suite d'essais s'étendant exclusivement sur les types de sols de la région du Sud-Ouest.

L'examen des chiffres cités révèle que la valeur des indices peut varier du simple au double — et, pour certains, au triple — sans que la signification à leur attribuer s'en trouve modifiée. On pourrait craindre, dans ces conditions, un manque de précision et de sûreté dans l'interprétation mais on constate à l'expérience qu'il n'en est rien et ceci pour les raisons suivantes :

— grâce au mécanisme de distorsion affectant les taux des éléments restant sous la forme minérale en cas d'alimentation insuffisante ou excessive, les variations prennent une ampleur telle qu'aucune incertitude ne peut subsister. Ainsi par exemple, la valeur optimale en NO_3^- peut varier entre 500 et 800 mg/l dans des plantes se développant bien, alors qu'en cas de déficience elle peut se trouver réduite à l'état de traces ou monter à plus de 2 000 mg/l en cas d'excès ;

— l'appréciation du niveau de chaque élément par rapport à plusieurs paramètres n'admet pas une interprétation erronée sans faire apparaître des contradictions, comme cela se produit lorsque le développement de la plante est contrôlé par un facteur non alimentaire.

b) *Appréciation de la nutrition azotée*

L'absorption et l'organisation de l'azote contrôlent la nutrition minérale des plantes en tous éléments et, inversement, une déficience intéressant l'un quelconque des éléments indispensables à la vie du végétal modifie les conditions de la nutrition et du métabolisme de l'azote.

C'est la raison pour laquelle nous avons multiplié les déterminations portant sur les substances azotées. On apprécie les teneurs en :

azote minéral (Nm) $\left\{\begin{matrix} NO_3^- \\ NH_4^+, \end{matrix}\right.$
azote aminé et amidé (Nam),
azote protéique (NP),
azote soluble total (NST).

Dans les sucs de maïs, la fraction la plus stable est représentée par l'azote protéique, dont le taux varie, au stade de l'apparition de la panicule mâle, dans les sucs extraits de la moitié basale de la nervure de la sixième feuille, entre 150 et 200 mg lorsque la nutrition azotée est abondante.

Dans les mêmes conditions, on trouve :

500 à 800 mg/l de N (NO_3^-),
15 à 30 mg/l de N (NH_4^+),
150 à 500 mg/l de N aminé + amidé ;

en additionnant ces fractions, on trouverait, pour l'azote soluble total, une plage s'étendant de 850 mg à 1 600 mg, à l'intérieur de laquelle seraient compris les taux signifiant une nutrition abondante. En fait, on constate que les taux de N. S. T.

correspondant aux rendements voisins de 80 q. se situent autour de 1 200 mg/l. Cette contraction est due au fait que les teneurs les plus basses de l'une des formes de l'azote ne correspondent généralement pas aux niveaux les plus bas des autres ;

— lorsque l'activité synthétique de la plante est intense, le contenu amidé et aminé s'accroît aux dépens des formes minérales ; dans le cas contraire, on observe le phénomène inverse : la fraction minérale augmente alors que l'azote, amidé et aminé, régresse ;

— la réserve permanente d'azote minéral, qui semble nécessaire pour assurer un déroulement normal du processus métabolique et, par suite, l'obtention de rendements élevés se situe au-dessus de 350 mg, même si l'activité organisatrice de la plante est particulièrement intense ;

— au-dessus de 800 mg de Nm, il y a lieu de considérer l'alimentation en azote comme excessive si les fractions aminées, amidées et protéiques atteignent des niveaux élevés et signifiant un ralentissement de l'organisation, si ces fractions ne dépassent pas les taux indiqués ;

— il en résulte que le rapport optimal Nm p. 100 N. S. T. se situe, au stade physiologique considéré, aux environs de 50 p. 100, avec des écarts de ± 10 p. 100 ;

— si les fractions minérales amidées et aminées sont importantes alors que l'azote protéique est peu abondant, on se trouve en présence d'un blocage de la formation des chaînes protéiques dont les causes peuvent être multiples. Nous avons observé ce phénomène à la suite d'une carence en phosphore, en soufre et en zinc ;

— les taux d'azote ammoniacal dans le cas du maïs se situent généralement entre 10 et 25 mg de N (NH_4^+)/l de suc. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature, ni rencontré nous-même, de teneurs nettement plus élevées dans des plantes d'apparence normale au-delà du stade de 6 à 8 feuilles ; par contre, dans de jeunes plantules ne disposant que de faibles réserves glucidiques et d'une surface foliaire réduite, l'azote ammoniacal peut s'accumuler et atteindre des niveaux toxiques (W. ROUTCHENKO et J. DELMAS, 1962). La cause directe de cette accumulation réside dans une fourniture de NH_4^+ excédant les possibilités organisatrices de la plante. Une telle situation se traduit, dans une première phase, par une élévation des taux de l'azote amidé, résultant d'une condensation des fonctions aminées ;

— l'azote nitrique représente la fraction dont les variations affectent la plus grande amplitude. La connaissance du taux de N (NO_3^-) pourrait suffire à caractériser le niveau de l'alimentation azotée si ces taux n'étaient pas sous la dépendance à la fois de l'intensité de l'absorption et de l'organisation. On ne peut leur attribuer une signification précise tant que le rôle de chacun des phénomènes en présence n'a pas été déterminé ;

— le taux élevé de N (NO_3^-) indique une alimentation intense lorsque toutes les fractions azotées sont également bien représentées. Dans le cas contraire, les taux élevés de N (NO_3^-) indiquent une activité synthétique insuffisante ;

— les teneurs particulièrement basses en N (NO_3^-) signifient une insuffisance de l'alimentation azotée si le niveau d'azote organique est également bas. Dans le cas contraire, on se trouve en présence d'une organisation particulièrement active et il est permis d'affirmer qu'une augmentation des apports pourrait accroître la croissance de la plante, même si celle-ci est déjà importante.

On voit que, dans un premier temps, la nutrition azotée se trouve appréciée d'une façon indépendante du niveau des autres éléments, en considérant les rapports qui unissent entre elles les différentes formes d'azote présentes dans la plante.

Les enseignements qui peuvent être tirés de cet examen vont au-delà de la seule connaissance des conditions de la nutrition azotée de la plante, car ils permettent de se faire une opinion sur le caractère de son activité métabolique, connaissance nécessaire à l'interprétation des résultats relatifs aux autres éléments.

Le tableau 10 résume les différents éléments de l'appréciation de la nutrition azotée.

TABLEAU 10

Signification des taux mesurés par rapport aux valeurs optimales (V. O.)

Nutrition azotée de *Zea Mays*. Stade de la floraison.
Rendement 70-80 q/ha

Indices	Alimentation azotée insuffisante	Développement exceptionnellement intense	Alimentation excessive	Utilisation freinée par facteur limit.
Ind. de développement ID	$<$ V. O.	$\geqslant$ V. O.	$\geqslant$ V. O.	$<$ V. O.
Azote minéral	$<$ V. O.	$<$ V. O.	$>$ V. O.	$>$ V. O.
Azote aminé + amidé ...	$<$ V. O.	$\leqslant$ V. O.	$>$ V. O.	$\geqslant$ V. O.
Azote protéique	$<$ V. O.	$\geqslant$ V. O.	$>$ V. O.	$\leqslant$ V. O.
Azote soluble total	$<$ V. O.	$\leqslant$ V. O.	$>$ V. O.	$>$ V. O.
Nm % N. S. T.	$<$ V. O.	$\leqslant$ V. O.	$>$ V. O.	$\geqslant$ V. O.
N. S. T./P. S. T.....	$<$ V. O.	$\geqslant$ V. O.	$>$ V. O.	$\geqslant$ V. O.
NO_3^-/Σ A	$<$ V. O.	$\leqslant$ V. O.	$>$ V. O.	$\geqslant$ V. O.
Σ C/Σ A	$>$ V. O.	$>$ V. O.	$<$ V. O.	$<$ V. O.

c) *Appréciation du niveau de la nutrition phosphorique*

La nutrition phosphorique est appréciée en considérant :

— les valeurs absolues des indices relatifs au phosphore minéral, glucidique, protéique et total ;

— les rapports existant entre ces diverses fractions et les indices relatifs à la nutrition azotée.

Les variations qui intéressent le phosphore minéral obéissent à un mécanisme analogue à celui qui contrôle les niveaux de l'azote nitrique et ammoniacal : ces variations dépendent à la fois du niveau de l'absorption et de l'intensité de l'organisation.

Dans le cas du maïs au stade de la floraison mâle, les sucs extraits de l'organe de référence doivent contenir de 40 à 60 mg de P ($PO_4H_2^-$) pour que des rendements élevés puissent être escomptés.

En cas d'une déficience azotée, le phosphore minéral s'accumule.

Dans les conditions d'organisation intense, les taux de P ($PO_4H_2^-$) ne devraient jamais descendre au-dessous de 30 à 35 mg pour que la nutrition phosphorique puisse être considérée comme satisfaisante, alors que les teneurs dépassant 150 mg par litre dénotent, soit une absorption excessive, soit une utilisation insuffisante.

Dans le premier cas, on trouvera la fraction glucidique et protéique à un niveau élevé, alors que dans le second, elle se situe au-dessous de la moyenne.

La fraction protéique est assez stable et se maintient entre 80 et 100 mg/l, sauf en cas de déficience caractérisée, alors que le phosphore glucidique évolue entre 50 et 100 mg.

Par suite, on trouve généralement dans des plantes bien alimentées 150 à 250 mg/l de phosphore soluble total (sans tenir compte du phosphore lipidique), alors que le rapport optimal Pm p. 100 P. S. T. se situe au voisinage de 25 p. 100.

Nous avons indiqué que 1 200 mg de N. S. T. étaient nécessaires pour assurer des rendements élevés ; il en résulte que le rapport N. S. T./P. S. T. devrait se trouver compris entre 4,8 et 8.

d) *Appréciation de la nutrition en soufre*

L'analyse renseigne sur les quantités de soufre minéral (Sm) et sur le soufre soluble total (S. S. T.) contenus dans les sucs. Les taux de soufre sont relativement stables et, dans la plupart des cas, voisins de ceux du phosphore.

Dans des plantes bien alimentées, on trouve couramment ;

30 à 50 mg de soufre minéral/l ;

60 à 150 mg de soufre soluble total/l.

Il arrive cependant que certaines plantes se développant bien renferment moins de soufre sous l'une et l'autre forme, sans que l'on enregistre une baisse de rendement. Celle-ci n'apparaît que lorsque le taux de soufre soluble total se situe au-dessous de 60 mg et que le rapport Sm/S. T. est inférieur à 20 p. 100. Corrélativement, on trouve les fractions protéiques de l'azote et du phosphore au-dessous des teneurs optimales ; par contre, une déficience en P ou en N détermine une élévation du rapport Sm/S. S. T. qui peut franchir le cap des 50 p. 100.

e) *Appréciation du taux de chlore*

Dans les maïs au stade de la floraison mâle, les taux de chlore sont extrêmement variables. Nous avons enregistré des teneurs allant de 500 mg à 5 g de Cl par litre de suc.

Les taux faibles correspondent généralement à une forte alimentation en azote nitrique, alors que les taux élevés dénotent une déficience de la nutrition azotée.

Une alimentation cationique abondante provoque également une absorption intense de Cl, surtout si le potassium représente une part importante dans la somme des cations absorbés.

L'excès de Cl ralentit la synthèse des protéines quand il ne provoque pas leur dégradation, en sorte que l'azote et le phosphore protéique sont alors faiblement représentés (KURSANOV et *al.*, 1962).

Il semble que le seuil de toxicité du Cl pour le maïs se situe aux environs de 4,5 g/l, alors qu'entre 2.5 et 4 g on observe déjà une dépression de l'absorption des anions métaboliques et une baisse du rapport NO_3^-/Cl^-.

f) *Appréciation de l'équilibre et du niveau de la nutrition anionique*

La somme des anions exprimée en milliéquivalents par litre de suc permet de juger non seulement du niveau et de l'équilibre de la nutrition anionique de la plante, mais également de l'intensité de son activité métabolique.

Les ions phosphoriques et sulfuriques jouent quantitativement un rôle peu important dans cette somme, aussi leur valeur est mieux appréciée par les indices métaboliques : Pm p. 100 P. S. T. et Sm p. 100 S. S. T.

Les ions NO_3^- et Cl^- peuvent représenter jusqu'à 97 p. 100 de la somme des anions minéraux dosés, les taux du premier devant se maintenir au-dessus de 30 p. 100 alors que ceux du second devraient rester inférieurs à 60 p. 100 pour ne pas exercer une action dépressive.

Du fait de la variabilité des taux de NO_3^- et de Cl^-, la somme des anions peut différer pour des rendements voisins mais sa valeur s'écarte rarement de 80 à 100 méq/l. de suc.

g) *Appréciation de l'équilibre et du niveau de la nutrition cationique*

Dans le suc du maïs au stade de la floraison, la somme des cations minéraux oscille entre 120 et 180 méq. par litre.

L'absorption des cations est pour une large part sous la dépendance de l'absorption et de l'organisation des anions minéraux et de la production d'anions organiques.

Chaque espèce végétale a tendance à maintenir un niveau spécifique d'anions organiques (A. SCHUFFELEN et *al.*, 1965), d'où l'intérêt du bilan anions/cations.

Si le niveau de la nutrition anionique est bas, l'absorption des cations se trouvera déprimée également mais il ne faudra pas pour autant conclure à une pauvreté du milieu en cations assimilables. Dans de tels cas, l'examen de l'équilibre cationique fait ressortir une diminution plus importante des cations bivalents. Ce même phénomène peut être observé lorsqu'on élève le niveau général de la nutrition minérale : la faible mobilité de Ca^{++} exige qu'il soit présent dans une proportion plus élevée en milieu riche qu'en milieu pauvre. Déjà, en 1936, G. BARBIER avait établi que les teneurs élevées en Ca^{++} déprimaient l'absorption de Mg^{++} et de $PO_4H_2^-$, alors que l'absorption de K^+ n'était affectée que dans la zone de carence en cet élément. L'abondance en K^+ favoriserait l'absorption des anions Cl^- et SO_4^{--}. D. BLANC (1962), en accord avec de nombreux chercheurs, considère que l'équilibre cationique observé à un niveau donné dépend de processus de transfert à l'intérieur du végétal et de l'espèce considérée.

III. ÉTABLISSEMENT DU DIAGNOSTIC

En l'absence d'informations autres que celles fournies par le laboratoire, les conclusions auxquelles on pourra parvenir se limitent à la mise en évidence de la nature de l'équilibre et du niveau de la nutrition minérale de la plante, compte tenu de son activité métabolique et de son développement.

Le tableau 11 permet de classer les échantillons en quatre catégories, en fonction du niveau des indices relevés :

— plantes insuffisamment alimentées,

TABLEAU II

Signification des taux différents de la valeur optimale
Nutrition anionique *Zea Mays*. Stade de la floraison. Rendement 70-80 q/ha

Indices relatifs à	Nutrition insuffisante	Développement intense	Alimentation excessive	Développement freiné (facteur limitant)
Indice de développement	ID < VO	ID ⩾ VO	ID ⩾ VO	ID < VO
—	—	—	—	—
Azote	NST < VO Nm % NST < VO NO_3^-/Σ A < VO Pm % PST > VO Cl^- > v. critique Sm % SST > VO	NST ⩽ VO Nm % NST ⩽ VO P % PST < VO Σ A < VO Cl^- < v. critique Sm % SST < VO	NST > VO Nm % NST > VO NO^{3-}/Σ A > VO P % PST < VO Cl^- < v. critique	NST > VO Nm % NST ⩾ VO P % PST > VO Sm % ST > VO NP < VO Pp ⩽ VO + indices spécifiques en fonction de la nature du facteur limitant.
Indice de développement	ID < VO	ID > VO	ID > VO	ID < VO
—	—	—	—	—
Phosphore	PST < VO Pm % PST < VO Nm % NST > VO Sm % SST > VO	PST < VO Pm % PST < VO Nm < VO Sm % SST < VO	PST > VO Pm % PST > VO Nm % NST < VO Sm % SST < VO	PST — SS Pm % PST > VO Nm > VO Pp < VO Np < VO + i. sp. fact. lim.
Indice de développement	ID ⩽ VO	ID > VO	ID ⩾ VO	ID < VO
—	—	—	—	—
Soufre	SST < VO Sm % SST < VO Pp < VO Np < VO Nam > VO Pg > VO	SST < VO Sm % SST < VO Pp, Np ⩾ VO Nam, Pg < VO	SST > VO Sm % SST > VO	Niveau des indices fonction de la nature du facteur limitant.
Indice de développement			ID ⩽ VO	ID < VO
—	—	—	—	—
Chlore			Cl > V critique Cl%ΣA > V crit. NO_3^-/Cl < VO	*dito*
Indice de développement	ID < VO	ID > VO	ID > VO	ID < VO
—	—	—	—	—
Σ Anions	Σ C > VO Σ A < VO ΣC/Σ A > VO	Σ C ⩽ VO Σ A < VO Σ C/Σ A ⩾ VO	Σ C — VO Σ A > VO Σ C/Σ A < VO	*dito*

— plantes bien alimentées mais se trouvant en période d'intense développement,

— plantes recevant une alimentation excessive en certains éléments,

— plantes dont le développement est déprimé par un facteur limitant.

Ce premier classement est nécessaire pour éviter tout risque de confusion :

— d'une part entre les plantes recevant une alimentation insuffisante et celles qui organisent intensément les ions absorbés ;

TABLEAU 12

Signification des taux différents de la valeur optimale

Nutrition cationique *Zea Mays*. Stade de la floraison. Rendement 70-80 q/ha

Indices relatifs à	Nutrition insuffisante	Développement intense	Alimentation excessive	Développement freiné par facteur limitant
Indice de développement	$< VO$	$> VO$	$\leqslant VO$	$< VO$
—	—	—	—	—
K^+	$K^+ < VO$ $K\ \% \ \Sigma\ C < VO$ $\Sigma\ C < VO$ $Pm\ \% \ PST < VO$ $K/Nm < VO$	$K^+ \geqslant VO$ $K\ \% \ \Sigma\ C \geqslant VO$ $\Sigma\ C \geqslant VO$ $\Sigma\ C/\Sigma\ A > VO$	$K^+ > VO$ $K\ \% \ \Sigma\ C > VO$ $K/Mg > VO$	$K^+ > VO$ (1)
Indice de développement	$\leqslant VO$	$> VO$	$\geqslant VO$	$< VO$
—	—	—	—	—
Ca^{++}	$Ca^{++} < VO$ $Ca^{++}\ \% \ \Sigma\ C < VO$ $Nm\ \% \ NST > VO$ $Pm\ \% \ PST > VO$	$Ca > VO$ —	$Mg < VO$ $Nm\ \% \ NST < VO$ $Ca^{++} > VO$ $Ca\ \% \ \Sigma\ C > VO$	(1)
Indice de développement	$\leqslant VO$	$> VO$	$\geqslant VO$	$< VO$
—	—	—	—	—
Mg^{++}	$Mg < VO$ $Mg\ \% \ \Sigma\ C < VO$ $K/Mg > VO$ $Nm\ \% \ NST > VO$	$Mg \geqslant VO$ $K/Mg \neq VO$	$Mg > VO$ $Mg\ \% \ \Sigma\ C > VO$ $K/Mg < VO$	$Mg \geqslant VO$ (1)
Indice de développement			$\neq VO$	
—	—	—	—	—
Na^+			$Na > VO$ $K < VO$ $Na\ \% \ \Sigma\ C > VO$	
Indice de développement	$< VO$	$> VO$	$> VO$	$< VO$
—	—	—	—	—
Σ Cations (y compris NH_4^+)	$\Sigma\ C/\Sigma\ A < VO$	$\Sigma\ C/\Sigma\ A > VO$	$\Sigma\ C/\Sigma\ A > VO$	(1)

(1) Autres indices fonction de la nature du facteur limitant.

— de l'autre, entre celles qui reçoivent une alimentation excessive en certains éléments et les plantes dont le développement est freiné par suite de la déficience d'un facteur, alimentaire ou non, qui entraîne une mauvaise utilisation et un accroissement des taux d'autres éléments.

Le rapprochement des résultats analytiques et des valeurs de référence permet de désigner l'élément présent au niveau le plus bas, qui contrôle de ce fait le développement de la plante. Les niveaux des autres éléments doivent être appréciés en tenant compte de la nature de l'élément déficient, celle-ci étant susceptible de modifier la signification de leurs taux d'une façon caractéristique.

Le tableau 12 indique le sens des variations des principaux indices en présence d'une situation alimentaire donnée. La connaissance des processus métaboliques et des phénomènes synergiques et antagonistes est nécessaire à une interprétation complète et nuancée des résultats.

CONCLUSION

La méthode dont nous venons d'exposer les principes et de décrire les processus d'utilisation exige, comme nous venons de le voir, une conception à la fois analytique détaillée et synthétique pour une interprétation valable.

Dans la mesure où, devant des cas concrets, les chercheurs s'efforceront d'en utiliser à plein les possibilités, cette méthode conduira à une interprétation susceptible de permettre la résolution de nombreux problèmes de nutrition.

A côté de l'analyse chimique du sol et des méthodes de diagnostic du sol et de la plante actuellement utilisées, l'analyse dynamique des éléments absorbés dans les tissus conducteurs apporte son support fondamental, sa précocité d'utilisation et ses conclusions synthétiques sur le bilan fournitures-absorption, en fonction des conditions du milieu où la plante est appelée à se développer.

Reçu pour publication en mars 1967.

SUMMARY

EVALUATION OF THE MINERAL-NUTRITION OF PLANTS BASED ON THE ANALYSIS OF THE JUICES EXTRACTED FROM CONDUCTIVE TISSUES

The method described herein is based on evaluating the nutritional dynamics of plants. The aggregate contents of plant nutrients are considered as typical of their absorption level, whereas the remaining mineral portion is likened to internal food storage which the plant uses either metabolically or through dilution arising from the migration of plant nutrients in new tissues or organs. The extent of such storage is a clue to the portion exceeding the plant's ability to use that portion at the relevant time. Such ability is likened to requirements. Adoption of the aforesaid physiological bases governs the selection of *a*) the material to be used for analysis (consisting of fresh extracts from conductive tissues), and *b*), of the reference organ, the techniques and manipulative processes which are fully gone into.

The experimental conditions and interpretative norms are set forth on the basis of typical examples excerpted from studies involving use of this method.

ZUSAMMENFASSUNG

BEURTEILUNG DER BEDINGUNGEN DER MINERALISCHEN PFLANZENERNÄHRUNG AUF GRUND DER ANALYSE DER AUS DEN LEITUNGSGEWEBEN EXTRAHIERTEN SÄFTE

Die vorgeschlagene Methode fusst auf der Bestimmung des Dynamismus der Ernährungsphänomene. Der gesamte Stoffgehalt der Pflanze wird als kennzeichnend für ihre Absorptionsebene angesehen, wogegen der mineralisch verbleibende Teil zu einem inneren Lebensmittelsvorrat assimiliert wird, den die Pflanze entweder durch Metabolismus oder dank der infolge der Migration der Stoffe in den neuen Geweben und Organen hervorgerufenen Verdünnung, ausnützt. Die Grösse des inneren Lebensmittelvorrates gibt Auskunft über den Bruchteil, der das Vermögen des Pflanzenverbrauches im betrachteten Augenblick übersteigt. Dieses Vermögen wird mit dem Nährstoffbedarf identifiziert. Die Annahme der obenerwähnten physiologischen Grundsätze bestimmt die Wahl des zur Analyse verwendeten Materials, das aus frischen Extrakten der Leitungsgewebe besteht, sowie die Wahl des Referenzorganes, der Techniken und der Analysenverfahren, die ausführlich beschrieben werden.

Die Anwendungsbedingungen und die Interpretierungsnormen werden an Hand von Beispielen dargestellt, die aus Untersuchungen gemäss der vorbeschriebenen Methode gewonnen wurden.

РЕЗЮМЕ

Оценка условий минерального питания растений на основании анализов их сока выделенного из проводящих тканей.

В. РУТЧЕНКО - Пон-де-ла-Май.

Предлагаемый метод основан на оценке динамизма феноменов питания. Общее содержание элементов в растении рассматривается как показатель уровня их поглощения, в то время как фракция остающаяся в минеральной форме, приравнивается ко внутренним пищевым запасам, которые растение использует, или метаболическим путем, или при помощи разбавления в результате миграции этих элементов по направлению к новым органам и тканям. Количество внутренних пищевых запасов дает представление о фракции которую растение не может потребить в данный момент, возможность-же потребления рассматривается как нужды растения. Принятие указанных физиологических основ направляет выбор материала необходимого для анализов, представляющего в данном случае вытяжки из проводящих тканей, выбор соответствующего органа, технических приемов и оперативных методов, детально описываемых автором.

Автор приводит затем несколько примеров изучений проведенных при помощи описанного метода, для пояснения его применения и интерпретации.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AIDINIAN R. C., 1957. Dosage du soufre dans le sol, minéraux et végétaux. *Potchvovedenie*, 4-9, 49-59.

BARBIER G., 1936. Contribution à l'étude de la nutrition minérale de la plante en fonction de la composition chimique du milieu. *Ann. agron.*, 569-586.

BAYER E., MÖLLINGER, 1959. Mikrobestimmung selektive Abstrennung und Anreicherung von Uran Mittels Schiffscher Basen. *Ang. Chem.*, **71**, 426.

BRUNEL A., 1954. *Traité de Chimie végétale.*

BLANC D., 1962. Observations sur l'équilibre cationique du végétal. *Agrochimica*, **7**, N. 1, 38-45.

BLANC D., 1964. Recherche d'un test analytique pour contrôler la nutrition azotée de la tomate. *Colloque Européen sur le Controle de la Nutrition minérale*, Montpellier.

BURSTRÖM M., 1943. Métabolisme et pH. *Landbruks Högskol Ann.*, 11-1.

CALDWEL, MOYER, 1935. *Ind. Eng. Chem., Anal. Ed.*, **7**, 38-35.

CARLES J., et coll., 1964. Taux comparés du pétiole et du limbe de vigne pour quelques éléments minéraux. *C. R. Acad. Sci.*, **259**, nº 8, 1541.

CHOUTEAU J., 1960. *Équilibre acides-bases dans le tabac paraguay.* Thèse Fac. Sci., Bordeaux.

CHTCHETININA L. L., BOUTENKO V. A., 1957. Dosage colorimétrique d'azote total dans le sol et dans les végétaux. *Potchvovedenie*, **8**, 98-101.

COLLET G., 1963. Dosage de l'azote et validité des résultats. *Bull. Soc. bot.* Suisse, **73**, 332-338.

DALY J. M. et coll. 1949. *Phytopatology*, **39**, 780-788.

DELMAS J., ROUTCHENKO W., BAUDEL C., 1959. *C. R. Acad. Agric.*, nº 16, 796-802.

DEMOLON A., 1950. « *Croissance des végétaux cultivés.* Dunod, édit.

DIEHL H. et coll., 1950. The versenate titration for total hardness. *J. Amer. Water Works An.*, **42**, 49-56.

DUCET G., BATS J., DUPOUY-BRAS (Mme), 1951. Méthode de dosage colorimétrique rapide. *Ann. agron.*, **67.**

EKPETE D. M. et CORNFIELD A. H., 1964. Comparison of Kjeldahl sulfuric acid-hydrogene peroxide methods and their salicilic acid-thiosulfate modification. *Analyst*, **89**, 670-673.

FOLLET M. J., RATCLIFF P. W., 1963. Détermination of nitrites and nitrates in meat products. *J. Sci. Fd. Agric.* **14**.

GILBERT B. E., 1926. Adaptation de méthodes colorimétriques en vue du dosage de nitrates, du phosphore et du potassium dans les extraits de plantes. *Plant Physiol.*, **1**, 191-199.

GRAU, MIRNA, 1957. *Z. aral. Chem.*, 152-158.

GRIESS J. P., 1879. *Ber. dtsch. Chem. Ges.*, **12**, 426.

HANKS R. W., FELDMANN A. W., 1963. *Phytopatology*, **53**, 4, 419.

HEDIN L., DUVAL E., 1963. Recherches sur la présence de NO_3^- dans les plantes fourragères et prairiales. *Ann. Physiol. vég.*, **5** (1), 29-49.

HOMES J. et coll., (1950-1961). L'alimentation minérale des plantes et le problème des engrais chimiques. *Bull. Soc. R. Bot. Belge*, Éd. Masson, Paris, 1953.

HUGUET C. (Mme), 1966. *Rapport groupe diagnostic* (non publié).

ISAGER M., 1950. Étude comparative de trois méthodes de micro-dosage de l'azote. *Mém. Fac. Sci., Paris*, nº 1163.

JOHNSON C. M., ULRICH A., 1950. *Anal. Chem.*, **22**, 1526.

KALJU E., HANWAY I. Leaf areas in relation to yield of corn grain. *Agron. J.*, **58**, p. 16-17.

KORNILOV A. A., KOSTINA V. S., 1965. The optimum leaf area for obtening high pea yields. *Soviet Plant Physiol.*, **12**, 3, 480-481.

KURSANOV A. I., VISKREBENTSEVA E., 1960. *Fisiol. Rast*, **7**, 276.

LACHIA GARRIDA, 1964. Determination of sulphur in plant material. *Analyst*, **89**, 61-66.

LAGATU, MAUME (1930-1948). *Ann. Sci. agr.*, 1933, 1-52 ; 1934, 246-257 ; 1932, 306-362 ; 1930, 596-653.

LEMOIGNE et coll., 1937. Étude sur le métabolisme de l'azote chez les végétaux. *Chimie et Indust.*, **37**, 6.

LIEBEDIANTSEV A. N., 1960. *Travaux choisis.* Éd. Acad. Sci. Moscou.

LUNDEGARDH, 1951. *Leaf analysis.* Hilger and Watts Ltd. London.

LUNDEGARDH, 1955. Mecanism of absorption, transport, accumulation and secretion of ions. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **6**.

MAGNITSKI K. P., 1958. *Nouvelle méthode d'analyse des plantes et des sols.* Selchosgis.

MAUME, DULAC, 1945-1948. *C. R. Acad. Sci.*, 1945, 257-116 ; 1947, 1374 ; 1948, 861.

MAZOYER R., 1954. Possibilité d'emploi du versénate pour le dosage du calcium et du magnésium échangeables dans le sol. *Ann. agron.*, 1009-1016.

MURDOCK J. T., 1962. *Agr. abstr., 20-23, 43.*

NICHOLAS D. J. D., 1953. The application of rapid chemical tests to the diagnosis of mineral deficience of horticultural plants. *J. hortic. Sci.*, **30**, 260-267.

NIGHTINGALE G. T., ROBBINS W. R., SCHERMERHORN L. G., 1937. Freezing as a method of preserving plant tissue for determination of nitrogenous fractions. *New-Jersey Agr. Exp. Stn Bull.* 448.

PEACH K., TRACAY M., 1956. *Modern Methods of Plant analysis.*

ROUTCHENKO W., DELMAS J., 1962. De la formation de nitrates dans les plantes supérieures dont l'alimentation est exclusivement ammoniacale. *C. R. Acad. Sci.*, **256**, 2910-2913.

ROUTCHENKO W., 1962. Contribution à l'étude des variations de la composition du suc de maïs soumis à deux types d'alimentation azotée. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 4199-4201.

SAYRE J. D., MORRIS V. H., 1932. Use of expressed sap in determining the composition of corn tissues. *Plant Physiol.*, **7**, 261-272.

SHUFFELEN A., ROSANOW M., VAN DIEST A., 1964. Plant composition and mineral nutrition. *Comm. Ier Colloque Europ. Anal. Pl.*, Montpellier.

TEPE W., 1963. *L'azote de réserve dans le sarment de vigne.* Geioenhein, Rheingau.

ULRICH A., 1942. Régulation métabolique du pH. *Amer. J. Bot.*, 29-220.

VAN SCHOOR G., 1956. Détermination approchée de la richesse utile en cations d'un substrat de culture. *Ann. Physiol. vég., Bruxelles,* **3**, 55-79.

VIETS F. G., MOXON H. L., WHITEHEAD, 1948. Nitrogen distribution on the corn plant. *Agric. exper. Sta. Dakota,* **7**, 1-35, 7.

WILSON J. K., 1943. Nitrates in plants. *J. Amer. Soc. Agron.*, **35**, 279-290.

WATTIEZ N., STERNON F., 1935. *Chimie végétale,* Masson éd.

Ann. agron., 1967, **18** (4), 403-427.

INFLUENCE DE L'ADDITION D'ALUMINIUM, DE FER, DE CALCIUM, DE MAGNÉSIUM OU DE CUIVRE SUR LA MOBILITÉ ÉLECTROPHORÉTIQUE, LE SPECTRE D'ABSORPTION INFRAROUGE ET LA SOLUBILITÉ D'UN COMPOSÉ HUMIQUE.

C. JUSTE et J. DELAS

avec la collaboration technique de M. LASSERRE et C. MOLOT

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Ouest, 33 - Pont-de-la-Maye

SOMMAIRE

La fixation de Al^{+++}, Fe^{+++}, Cu^{++}, Ca^{++} ou Mg^{++} par des acides humiques entraîne une diminution de la mobilité électrophorétique de ces acides, l'importance de cette diminution étant fonction de la nature du métal associé. La fixation des métaux se traduit par une modification de spectre infrarouge des composés humiques, qui témoigne notamment de l'intervention de groupements carboxyliques dans les liaisons contractées entre fraction minérale et fraction organique. Le calcium diminue très fortement la solubilité des composés humiques dans les réactifs alcalins.

INTRODUCTION

Dans les sols, la fraction organique humifiée peut être juxtaposée ou bien associée à la fraction minérale ; les associations matière organique-matière minérale sont représentées, soit par des complexes organo-métalliques de solubilité et de stabilité très variables, dont la partie minérale est constituée par un ion métallique, soit par des formes d'adsorption des polymères organiques sur des adsorbants minéraux tels qu'hydroxydes ou silicates, des cations échangeables ou des gels métalliques de recouvrement jouant souvent dans ce cas le rôle de « ponts » entre les deux fractions.

Ces liaisons organo-métalliques ont une importance prépondérante dans certaines propriétés du sol telles que la capacité d'échange en bases et la stabilité structurale ; leur existence peut également influencer profondément les caractéristiques des polymères humiques : ce travail aura précisément pour but de voir de quelle

manière sont modifiées quelques-unes de ces dernières (notamment la mobilité dans un champ électrique, la solubilité dans divers réactifs et l'absorption dans l'infrarouge) quand on fait fixer sur un composé humique des métaux polyvalents susceptibles d'être rencontrés dans les sols, soit parce qu'ils s'y trouvent en abondance à l'état natif (aluminium, fer, calcium, magnésium), soit parce qu'ils y ont été apportés à la suite de certaines pratiques culturales (cuivre).

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE UTILISÉS

A — *Préparation des acides humiques*

Ils sont extraits de l'horizon superficiel d'un podzol humo-ferrugineux développé en lande humide (sol sableux des Landes de Gascogne). Le sol, séché à l'air et tamisé à 2 mm, est agité pendant 2 heures en présence de soude 0,5 N (50 g de sol pour 100 ml de soude 0,5 N). Après centrifugation et filtration, les acides humiques sont précipités, soit par addition de ClH pur, soit par addition de SO_4H_2 pur dans le cas où des déterminations de carbone doivent être faites par la suite. Après 16 heures de sédimentation, la fraction humique est séparée de la fraction fulvique par centrifugation ; les acides humiques sont rincés trois fois avec de l'eau distillée, puis dialysés en continu pendant 24 heures contre de l'eau distillée. Avant utilisation, la suspension est homogénéisée par une agitation d'une heure à l'agitateur rotatif.

B — *Fixation des métaux*

A 50 ml de la solution homogénéisée, on ajoute 20 ml d'une solution normale de métal, préparée soit à partir du chlorure correspondant, soit à partir d'un sel non halogéné quand des déterminations de carbone doivent être ultérieurement effectuées ($SO_4Fe\ 7\ H_2O$; $(NO_3)_2Ca\ 4\ H_2O$; $(NO_3)_3\ Al\ 9\ H_2O$ $SO_4Mg\ 7\ H_2O$; $SO_4Cu\ 5\ H_2O$) ; le mélange est ajusté à un pH déterminé (pH 1 ou pH 7) par addition d'acide (SO_4H_2 ou ClH pur) ou de soude. Ces deux pH ont été choisis de manière à se trouver soit dans la zone où la majeure partie du métal existe à l'état ionique (pH 1), soit dans celle où la majeure partie du métal précipite sous forme d'hydroxyde (pH 7), exception faite évidemment pour Ca^{++} et Mg^{++}, dont les seuils de précipitation sous forme d'hydroxydes se situent à des pH beaucoup plus élevés. Un mélange témoin est également préparé par addition de 20 ml d'une solution normale d'acide sulfurique ou chlorhydrique à 50 ml de la suspension d'acide humique, le pH de ce mélange étant également ajusté à 1 ou 7 par addition de soude.

Après 24 heures de contact, les acides humiques enrichis en métal sont séparés de la phase liquide par centrifugation et lavés trois fois avec de l'eau distillée ; ils sont ensuite : soit séchés à l'étuve jusqu'à poids constant, soit redissous dans 1 ml de soude normale en vue de l'électrophorèse sur papier. Les suspensions dont le pH a été ajusté à 7 en l'absence de métal ne donnent lieu à aucune précipitation et par conséquent, parmi les acides humiques témoins, seuls ceux précipités à pH 1 ont subi la série de traitements suivante.

C — *Électrophorèse sur papier*

On utilise du papier Whatman n° 1 ; la dépose (50 μ l) est effectuée sur une largeur de 5 cm ; la tension constante appliquée pendant 3 heures est de 7 volts/cm. Le tampon employé est le tampon boraté de Coulson à pH 9,2 (9,54 g/litre). Sous l'action du champ électrique, les acides humiques se séparent en trois fractions (DUCHAUFOUR et JACQUIN, 1963 ; JACQUIN, 1963) : une fraction migre vers l'anode (acides humiques bruns), une fraction demeure au voisinage de la dépose (acides humiques gris) et une fraction se localise entre les deux précédentes (acides humiques intermédiaires ; pour chaque acide humique enrichi en un métal donné à un même pH, on réalise deux séries d'électrophorégrammes que l'on sèche à l'air. Un électrophorégramme est découpé perpendiculairement au sens de la migration en bandes correspondant aux différentes fractions séparées ; ces bandes sont calcinées et l'on dose les métaux que contiennent les résidus de calcination, ce qui permet de déterminer la quantité de métal qui reste associée aux différentes fractions humiques au cours de leur migration. Un autre électrophorégramme est passé au densitomètre ; on obtient par planimétrie une évaluation quantitative des acides humiques qu'il contient. Le même électrophorégramme est

alors placé pendant 1/2 heure dans un bécher contenant un litre d'eau distillée agitée en permanence : une partie des composés humiques et des métaux qui leur sont liés passe alors en solution dans l'eau. Après sèchage à l'air, l'électrophorégramme est à nouveau passé au densitomètre, puis découpé en bandes, perpendiculaires au sens de la migration, dans lesquelles on détermine la teneur en métal.

Par comparaison des densitogrammes et des teneurs en métaux avant et après lavage à l'eau, on définit un indice de solubilité dans l'eau distillée des fractions humiques séparées par électrophorèse et des métaux qui leur sont associés.

D — *Spectres d'absorption dans l'infrarouge*

Après séchage à l'étuve, les acides humiques sont broyés finement puis mélangés à du bromure de potassium (1 mg de composé humique pour 100 mg de KBr) ; les pastilles sont examinées à l'aide d'un appareil UNICAM SP 200 à optique de NaCl. Compte tenu des possibilités de réaction du cuivre avec le bromure de potassium (MELOCHE et KALBUS, 1958 ; LAWSON, 1961) les spectres obtenus dans le cas des acides humiques enrichis en ce métal ont été comparés à ceux obtenus en présence d'un autre support (nujol).

Parallèlement aux spectres des acides humiques ayant fixé les différents métaux à pH 7, on a procédé, pour le cuivre, l'aluminium ou le fer, à l'enregistrement des spectres des hydroxydes métalliques correspondants, préparés dans les mêmes conditions de pH et à partir des mêmes sels.

E — *Solubilité des composés humiques enrichis en métal dans l'eau, la soude et l'acide sulfurique*

Un poids connu de composé humique est introduit dans un tube de centrifugeuse, dans lequel on ajoute selon le cas un volume déterminé soit d'eau, soit de soude 0,5 N, N/100 ou N/50, soit encore d'acide sulfurique 0,1 N. Après une heure de contact, la phase liquide est séparée par centrifugation de la phase solide, que l'on sèche et que l'on pèse. Pour chaque acide humique, on détermine avant et après action des différents réactifs les teneurs en carbone, azote et métal ; les mêmes déterminations sont effectuées dans le liquide d'extraction ; on peut ainsi calculer un pourcentage de solubilité de ces différents éléments dans l'eau, l'acide et la soude en fonction de la nature des métaux associés aux composés humiques.

Certains des acides humiques enrichis en calcium à pH 7 ont été soumis à un traitement préalable à l'acide sulfurique 0,1 N avant de subir l'action de la soude 0,5 N.

F — *Méthodes de dosage du carbone, de l'azote et des métaux*

Le carbone et l'azote ont été dosés selon la technique mise au point par ANSTETT (1956).

L'aluminium a été dosé par colorimétrie à 5 350 Å du complexe ériochromecyanine-Al^{+++} (HILL, 1956), le fer par colorimétrie à 5 150 Å du complexe orthophénantroline-Fe^{++} (SANDELL, 1959), le cuivre soit par colorimétrie à 5 450 Å du complexe 2-2′ diquinoléine-Cu^{+} (COPPENET et *al.*, 1954) pour des concentrations inférieures à 0,2 µg Cu^{++}/ml, soit par colorimétrie à 6 000 Å du complexe *bis*-cyclohexanone-oxalyldihydrazone-Cu^{++} (MAZOYER, 1958) pour des concentrations supérieures.

Le calcium et le magnésium ont été dosés par photométrie de flamme au photomètre BECKMAN DU (flamme oxygène-hydrogène) à 4 227 Å pour le calcium et 2 852 Å pour le magnésium.

II. — RÉSULTATS OBTENUS

A — *Électrophorèse sur papier*

Les enregistrements des électrophorégrammes au densitomètre sont représentés sur la figure 1.

Le tableau 1 précise l'importance des différentes fractions humiques évaluées par planimétrie, ainsi que les indices de mobilité, calculés en faisant le rapport de la fraction mobile à la fraction non mobile.

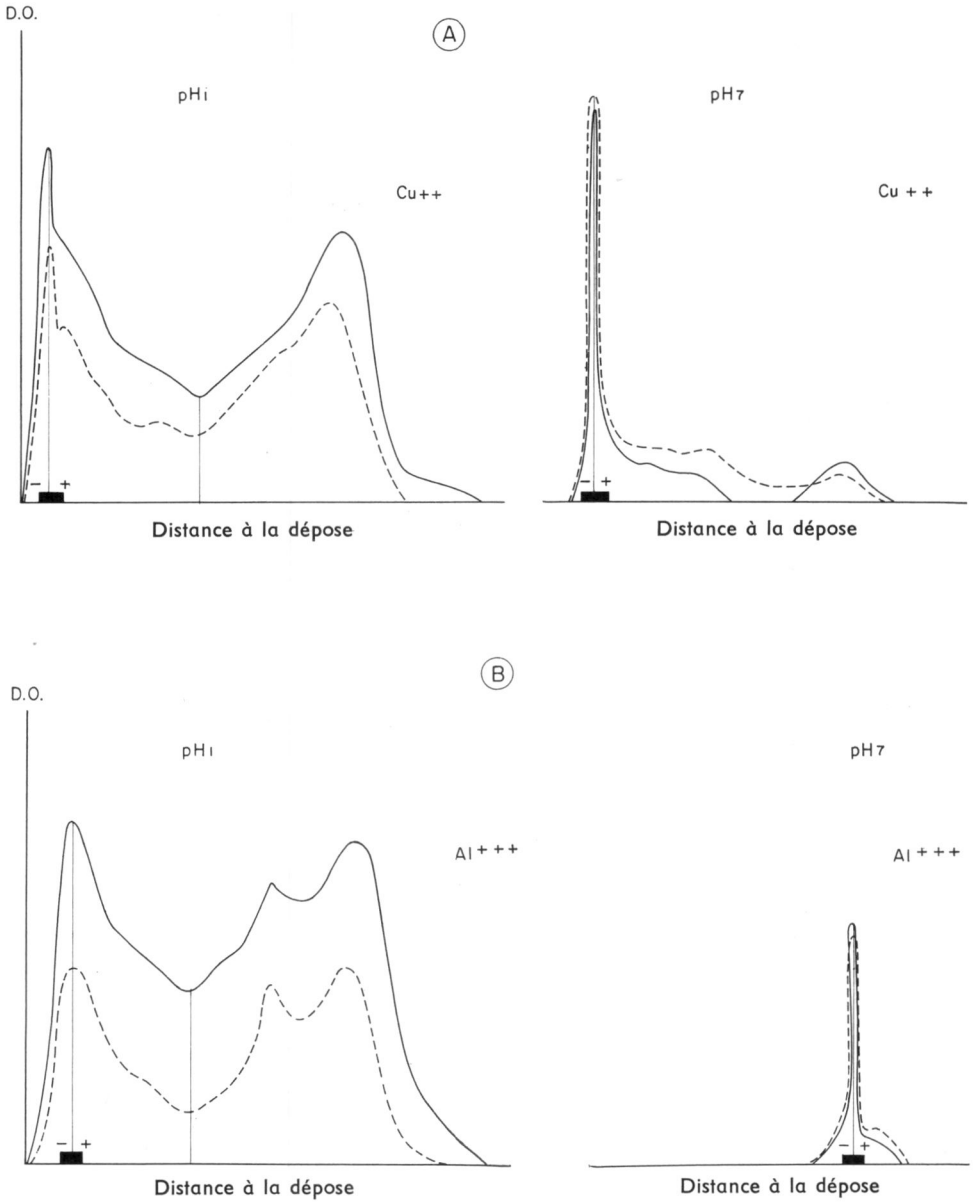


FIG. 1. — *Enregistrement densitométrique des électrophorégrammes d'acides humiques associés à différents cations*

(A) : Cu^{++}.
(B) : Al^{+++}.

——— Enregistrements effectués avant lavage à l'eau des électrophorégrammes ;
– – – – Enregistrements effectués après lavage à l'eau des électrophorégrammes ;
▬ Dépose

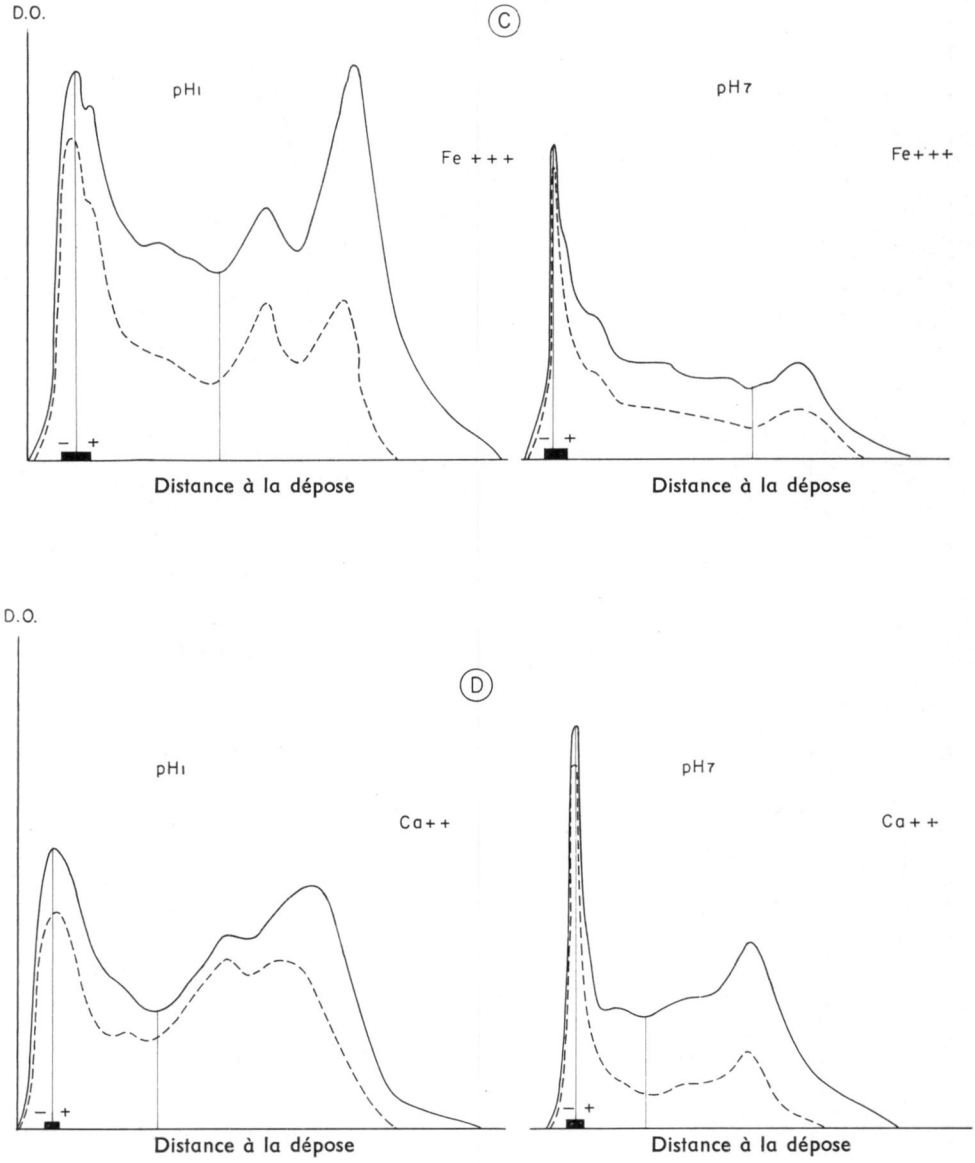
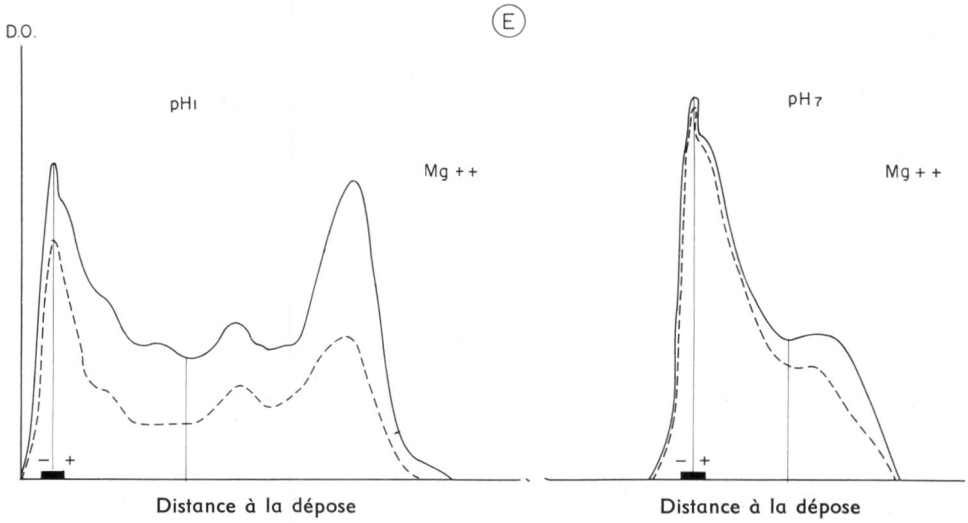


FIG. 1. — *(suite)*
Enregistrement densitométrique des électrophorégrammes d'acides humiques associés à différents cations.

(C) : Fe^{+++}.
(D) : Ca^{++}.



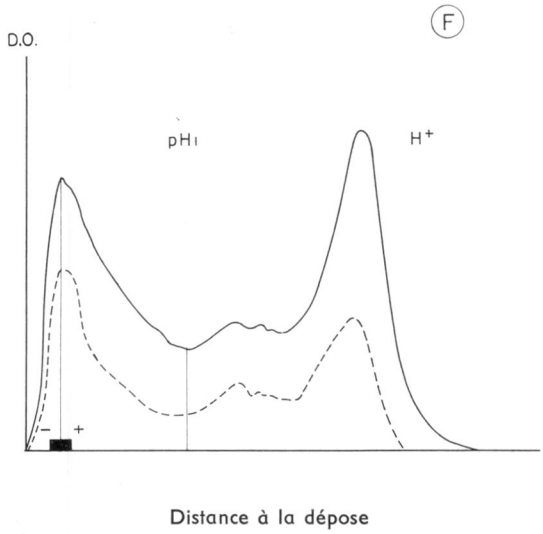


FIG. 1. — *(suite)*
Enregistrement densitométrique des électrophorégrammes d'acides humiques associés à différents cations

(E) : Mg^{++}.
(F) : H^{+}.

Le tableau 2 précise l'importance des différentes fractions humiques après trempage des électrophorégrammes dans l'eau distillée, ainsi que les variations relatives de chaque fraction à la suite de ce traitement.

TABLEAU 1

Répartition des acides humiques le long des électrophorégrammes avant lavage à l'eau distillée de ces derniers en fonction de la nature des métaux qui leur sont associés

(en p. 100 de la quantité totale d'acide humique contenu dans l'électrophorégramme)

	Fraction humique	Métal lié à l'acide humique					
		Cu^{++}	Fe^{+++}	Mg^{++}	H^{+}	Al^{+++}	Ca^{++}
Acides humiques enrichis à pH 1	Acides humiques gris	46	45	42	40	37	36
	Ac. humiques mobiles	54	55	58	60	63	64
	Indice de mobilité (1)	1,17	1,22	1,38	1,50	1,70	1,78
Acides humiques enrichis à pH 7	Acides humiques gris	79	75	70	—	100	38
	Ac. humiques mobiles	21	25	30	—	0	62
	Indice de mobilité (1)	0,27	0,33	0,43	—	0,00	1,63

(1) Indice de mobilité $= \dfrac{\text{Acides humiques mobiles}}{\text{Acides humiques gris}}$

(Acides humiques mobiles = acides humiques bruns + acides humiques intermédiaires.)

TABLEAU 2

Répartition des acides humiques le long des électrophorégrammes après lavage à l'eau distillée de ces derniers et variation des différentes fractions à la suite de ce traitement

	Fraction humique	Métal lié à l'acide humique											
		Cu^{++}		Fe^{+++}		Mg^{++}		H^{+}		Al^{+++}		Ca^{++}	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Acides humiques enrichis à pH 1	Acides humiques gris	44	— 37	58	— 38	45	— 45	47	— 44	38	— 54	39	— 28
	Ac. humiques bruns.	56	— 32	42	— 63	55	— 51	53	— 61	62	— 54	61	— 33
	Ensemble des acides humiques		— 34		— 52		— 48		— 56		— 54		— 31
Acides humiques enrichis à pH 7	Acides humiques gris	91	0	83	— 41	77	0			100	0	65	— 34
	Ac. humiques bruns.	9	— 44	17	— 63	23	— 27			0	0	35	— 66
	Ensemble des acides humiques		— 9		— 46		— 4				0		— 54

(1) Quantité d'acides humiques (en p. 100 de la quantité totale contenue dans l'électrophorégramme).
(2) Variation de chaque fraction à la suite du lavage à l'eau (en p. 100 de la quantité initiale).

TABLEAU 3

Répartition des métaux le long des électrophorégrammes avant lavage à l'eau distillée de ces derniers

	Fraction humique	Métal associé à l'acide humique									
		Cu^{++}		Fe^{+++}		Mg^{++}		Al^{+++}		Ca^{++}	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Acide humique enrichi à pH 1	Acides humiques gris	0,42	21	3,89	56	1,28	38	1,43	40	0,12	14
	Ac. hum. interm....	0,39	20	2,44	37	0,76	22	0,51	14	0,56	20
	Ac. humiques bruns.	1,17	59	0,66	7	1,34	40	1,64	46	2,18	76
	Indice de mobilité (1)	2,80		0,16		1,05		1,14		5,4	
Acide humique enrichi à pH 7	Acides humiques gris	68,03	99	47,73	100	6,21	72	52,86	100	2,80	57
	Ac. hum. interm. ..	0,58	0,7	0	0	0,76	9	0	0	0,60	13
	Ac. humiques bruns.	0,17	0,3	0	0	1,65	19	0	0	1,45	30
	Indice de mobilité (1)	0		0		0,26		0		0,53	

(1) Quantité de métal contenue dans chaque fraction humique (en µéq.).

(2) Quantité de métal contenue dans chaque fraction humique (en p. 100 de la quantité totale de métal contenue dans l'électrophorégramme).

(1) Indice de mobilité $= \dfrac{\text{Quantité de métal contenue dans la fraction brune}}{\text{Quantité de métal contenue dans la fraction grise}}$

TABLEAU 4

Répartition des métaux le long des électrophorégrammes après lavage à l'eau distillée de ces derniers et variation des quantités liées aux différentes fractions humiques à la suite de ce traitement

	Fraction humique	Métal associé à l'acide humique									
		Cu^{++}		Fe^{+++}		Mg^{++}		Al^{+++}		Ca^{++}	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Acide humique enrichi à pH 1	Acides humiques gris	0,33	— 21	3,54	— 9	0,68	— 47	0,88	— 38	0,12	0
	Ac. hum. interm. ..	0,28	— 28	1,42	— 42	0,62	— 18	0,28	— 45	0,40	— 29
	Ac. humiques bruns.	0,46	— 61	0,42	— 33	0,72	— 46	0,40	— 76	1,23	— 44
	Ensemble des acides humiques		— 46		— 33		— 40		— 56		—39
Acide humique enrichi à pH 7	Acides humiques gris	72,44	0	41,50	— 13	5,14	— 17	23,6	— 55	1,68	— 40
	Ac. hum. interm. ..	0,86	0	0	0	0,21	— 72	0	0	0,56	— 10
	Ac. humiques bruns.	0,17	0	0	0	0,31	— 81	0	0	0,75	— 48
	Ensemble des acides humiques		0		— 13		— 34		— 55		— 39

(1) Quantité de métal contenue dans chaque fraction humique (en µ-éq.).

(2) Variation de la quantité de métal contenue dans chaque fraction après lavage à l'eau (en p. 100 de la quantité totale).

Dans le tableau 3, on a représenté la répartition des métaux dans chaque électrophorégramme, ainsi que les indices de mobilité calculés en faisant le rapport de la quantité de métal contenue dans la fraction la plus mobile (acides humiques bruns) à celle contenue dans la fraction la moins mobile (acides humiques gris).

Dans le tableau 4, on a fait figurer la répartition des métaux dans chaque électrophorégramme après trempage dans l'eau distillée, ainsi que les variations relatives des quantités de métal associées à chaque fraction après ce traitement.

1. *Répartition des acides humiques sur l'électrophorégramme en fonction de la nature du métal qui leur est associé*

a) *Avant lavage à l'eau des électrophorégrammes* (tabl. 1, fig. 1).

A pH 1, la présence des métaux modifie relativement peu la mobilité des acides humiques : on note une légère augmentation de cette dernière pour Al^{+++} et pour Ca^{++} et une diminution pour Mg^{++}, Fe^{+++} et surtout pour Cu^{++}.

Les électrophorégrammes obtenus dans le cas des composés humiques ayant fixé les métaux à pH 7 sont totalement différents de ceux obtenus pour les composés correspondants enrichis à pH 1 : il y a diminution très importante de la mobilité, celle-ci devenant même nulle pour les composés humiques associés à Al^{+++} ; cette diminution marquée de la mobilité électrophorétique en présence de Al^{+++} a été signalée par l'un d'entre nous dans une publication antérieure (JUSTE, 1966). Il faut cependant signaler que, parmi les métaux polyvalents testés, seul le calcium n'affecte que très peu la mobilité électrophorétique des acides humiques ayant réagi à pH 7 avec ce cation (l'indice de mobilité passe de 1,78 à pH 1 à 1,63 à pH 7).

b) *Après lavage à l'eau des électrophorégrammes* (tabl. 2).

Dans le cas des acides humiques enrichis à pH 1, ce sont surtout les fractions brunes qui passent en solution dans l'eau distillée pour Fe^{+++}, H^{+}, Ca^{++} et Mg^{++} alors que pour Cu^{++} et Al^{+++} la dissolution intéresse plus la fraction grise que la fraction brune.

A pH 7, le caractère insoluble de la fraction grise est renforcé, la solubilisation de cette fraction devenant même nulle pour les acides humiques liés à Cu^{++}, Al^{+++} et Mg^{++}.

2. *Répartition des métaux sur les électrophorégrammes*

a) *Avant lavage à l'eau des électrophorégrammes* (tabl. 3).

Les différences de mobilité sont beaucoup plus importantes que celles des acides humiques correspondants ; le calcium apparaît comme le plus mobile à pH 1, suivi par le cuivre, la mobilité des autres cations (Mg^{++}, Al^{+++}, Fe^{+++}) étant beaucoup plus faible.

A pH 7, tout le métal demeure au niveau de la dépose dans le cas des acides humiques enrichis avec Cu^{++}, Al^{+++} et Fe^{+++} ; à ce pH, la mobilité est beaucoup moins affectée pour les acides humiques liés à Mg^{++} et Ca^{++}.

b) *Après lavage à l'eau des électrophorégrammes* (tabl. 4).

C'est la fraction du métal liée aux acides humiques bruns qui est la plus facilement éliminée par le traitement à l'eau, et cela aussi bien pour les composés humiques enrichis à pH 1 que pour ceux qui l'ont été à pH 7 ; dans ce dernier cas cependant, seule la fraction grise peut abandonner du métal à l'eau distillée dans le cas des acides humiques enrichis avec Fe^{+++}, Al^{+++} ou Cu^{++}, puisque la fraction mobile de ces acides n'en contient pas.

En résumé, les acides humiques associés aux différents métaux à pH 7 ont une répartition électrophorétique totalement distincte de celle qu'ils ont lorsqu'ils sont associés à ces mêmes métaux à un pH nettement acide : à pH 7, il y a une diminution très importante de la mobilité, l'aluminium, le fer et le cuivre s'avérant comme les agents d'immobilisation les plus efficaces ; le calcium par contre affecte relativement peu cette mobilité électrophorétique.

La répartition des métaux le long des électrophorégrammes dépend essentiellement de leur nature, le calcium et le cuivre apparaissant comme les plus mobiles à pH 1, alors qu'à pH 7 la majeure partie du cuivre, de l'aluminium, du fer et du magnésium est immobilisée au niveau de la dépose. Le lavage à l'eau des électrophorégrammes affecte surtout les acides humiques les plus mobiles sous l'action du champ électrique, ainsi que la fraction métallique qui leur est liée.

B — *Absorption dans l'infrarouge*

Pour les acides humiques ayant fixé les métaux à pH 1, on a seulement reproduit, dans la figure 2, la région spectrale correspondant aux vibrations des carbonyles (1 710 cm^{-1}) et aux déformations dans le plan des noyaux aromatiques (1 600 cm^{-1}) car c'est dans cette région que se manifestent les modifications les plus notables du spectre du composé humique lorsque ce dernier a fixé les différents métaux. Cette fixation se traduit par une diminution de l'intensité du pic à 1 710 cm^{-1}, diminution qui dépend de la nature du métal et qui varie dans l'ordre : $Mg^{++} < Ca^{++} < Al^{+++} < Cu^{++} < Fe^{+++}$, comme en témoigne la variation du rapport des densités optiques mesurées à 1 600 cm^{-1} et 1 710 cm^{-1}. Compte tenu du fait que l'on se trouve dans des conditions de pH où le composé humique est peu dissocié, il faut admettre que la disparition partielle de la bande à 1 710 cm^{-1} — qui reflète l'augmentation du pourcentage des groupements carboxyliques ionisés — ne fait que traduire l'intervention de ces groupements dans les liaisons contractées entre fraction minérale et fraction organique.

Les acides humiques précipités à pH 1 à l'aide de SO_4H_2 (fig. 3) fournissent un spectre identique à celui obtenu pour les acides humiques précipités par ClH ; on note simplement l'apparition d'un maximum d'absorption supplémentaire à 1 380 cm^{-1}, attribuable selon COLTHUP (1950) aux liaisons covalentes contractées par l'anion sulfate, et que l'on peut donc attribuer, dans le cas précis des acides humiques précipités par SO_4H_2 soit à une liaison directe entre sulfate et matière organique, soit — ce qui est plus probable — à une liaison de l'anion avec les impuretés minérales que renferme le polymère humique. La figure 3 met également en évidence l'apparition de bandes à 1 380, 1 140, 995, 650 cm^{-1}, qui sont dues à la présence de sulfate de calcium dans le cas des acides humiques ayant fixé ce métal à

pH 1 (pH ajusté à cette valeur à l'aide de SO_4H_2) ; ces bandes sont indiscernables (sauf celle située à 1 380 cm^{-1}) pour les acides humiques enrichis avec Ca^{++} à pH 7, c'est-à-dire dans des conditions où les probabilités de formation de sulfate de calcium sont plus faibles.

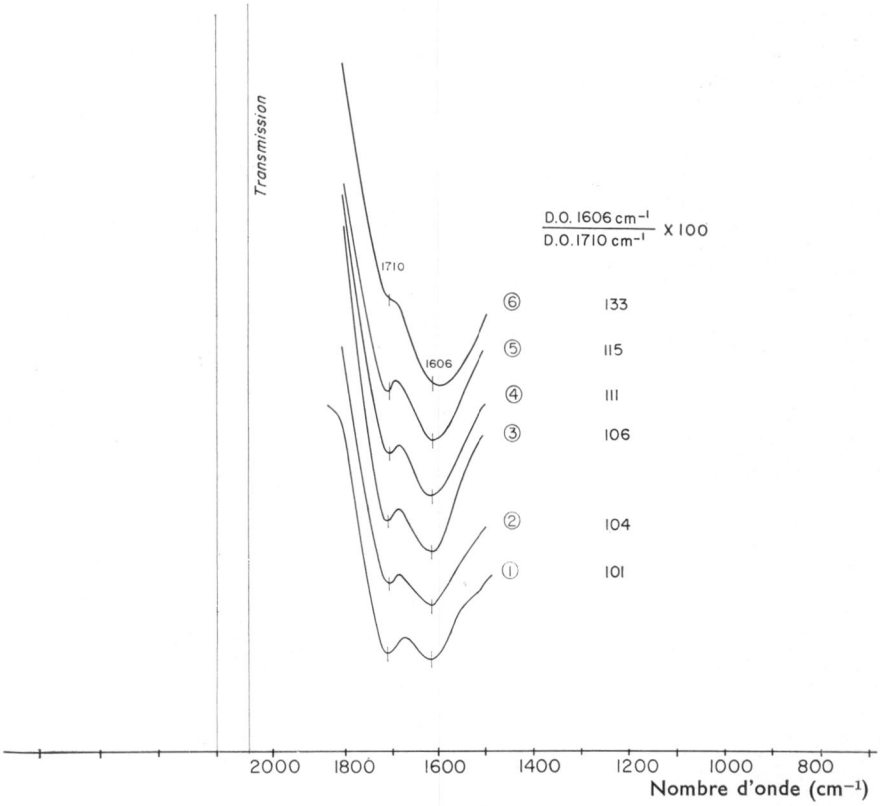


FIG. 2. — *Spectres d'absorption dans l'infrarouge d'acides humiques enrichis en différents métaux à pH 1*

1. Acides humiques non enrichis
2. Acides humiques enrichis avec Mg^{++}
3. Acides humiques enrichis avec Ca^{++}
4. Acides humiques enrichis avec Al^{+++}
5. Acides humiques enrichis avec Cu^{++}
6. Acides humiques enrichis avec Fe^{+++}

L'interprétation des spectres (fig. 4) correspondant aux acides humiques ayant fixé les métaux à pH 7 est extrêmement délicate ; à ce pH, en effet, les acides humiques sont contaminés par les hydrates métalliques (notamment ceux de Fe^{+++}, Al^{+++} et Cu^{++}), qui précipitent en abondance et dont le spectre peut masquer celui du composé humique, de sorte qu'il devient impossible de savoir si le spectre résultant obtenu est dû à l'apparition de liaisons entre fraction organique et fraction minérale ou simplement à la prédominance de la fraction minérale. Les modifications observées (disparition de la bande des carbonyles à 1 710 cm^{-1} et de l'épaulement situé vers 2 550 cm^{-1} — attribuable, selon ORLOV, ROZANOVA et MATYUKHINA (1962),

aux vibrations de valence des OH fortement associés par des ponts hydrogène —, glissement à 1 590 cm^{-1} de la bande antérieurement située à 1 610 cm^{-1}, augmentation de l'intensité de la bande située à 1 400 cm^{-1}) traduisent l'augmentation de la contribution des ions carboxylates et la diminution concomitante de celle des radicaux carboxyliques non ionisés. Il n'est cependant pas possible d'affirmer que les modifications observées résultent d'une réaction effective entre composés organiques et minéraux car, à ce pH, il est vraisemblable que les groupements carboxyliques de la fraction organique sont dissociés en grande partie, même en l'absence des métaux.

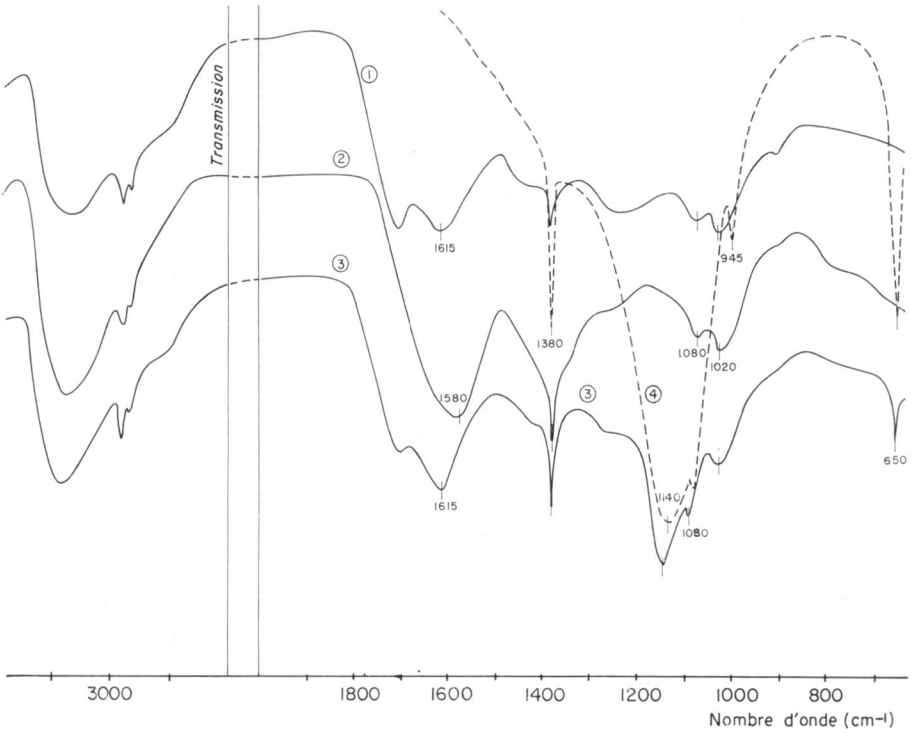
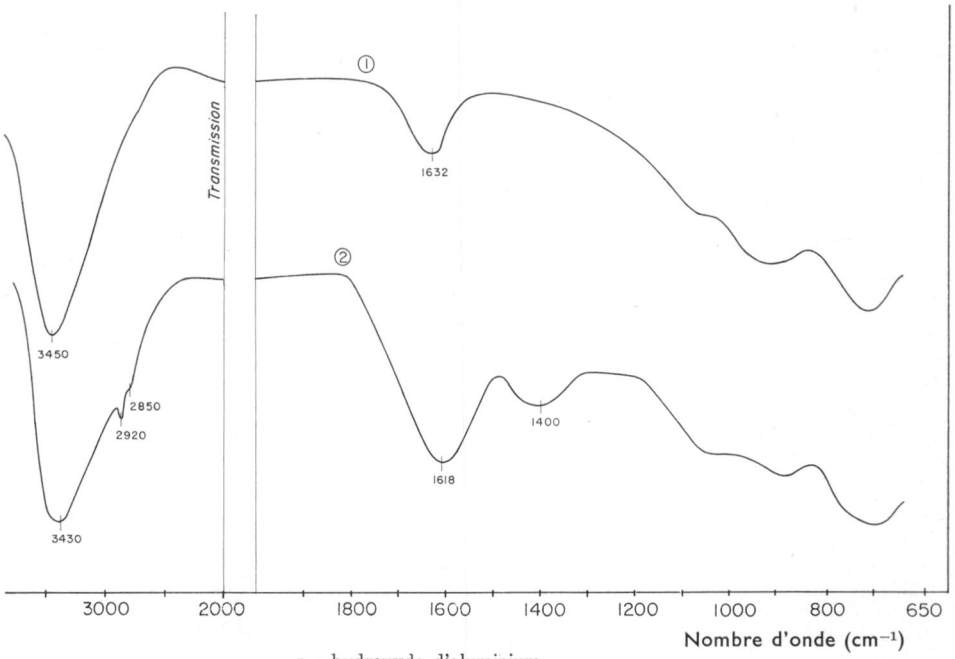


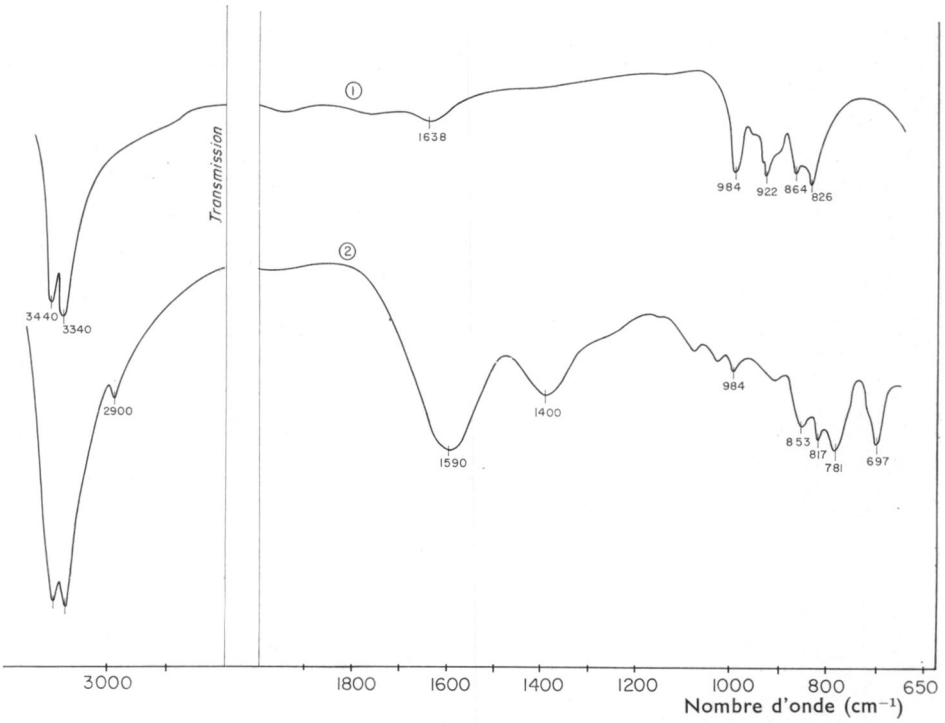
FIG. 3. — *Influence de l'anion sulfate sur le spectre d'absorption dans l'infrarouge d'acides humiques enrichis en calcium*

1. Acides humiques précipités à pH 1 par l'acide sulfurique
2. Acides humiques enrichis en calcium à pH 7
3. Acides humiques enrichis en calcium à pH 1
4. Sulfate de calcium

La plupart des bandes caractéristiques des hydroxydes se retrouvent dans les acides humiques ayant fixé les métaux : en particulier, on peut noter que, pour le spectre de l'hydroxyde de cuivre, un certain nombre de bandes fines apparaissent à 3 340, 3 440, 984, 922, 864 et 826 cm^{-1}. Ces bandes sont caractéristiques de l'hydroxyde de cuivre et ne résultent pas d'une éventuelle réaction entre Cu^{++} et le KBr, puisqu'elles subsistent quand on remplace le bromure de potassium par du

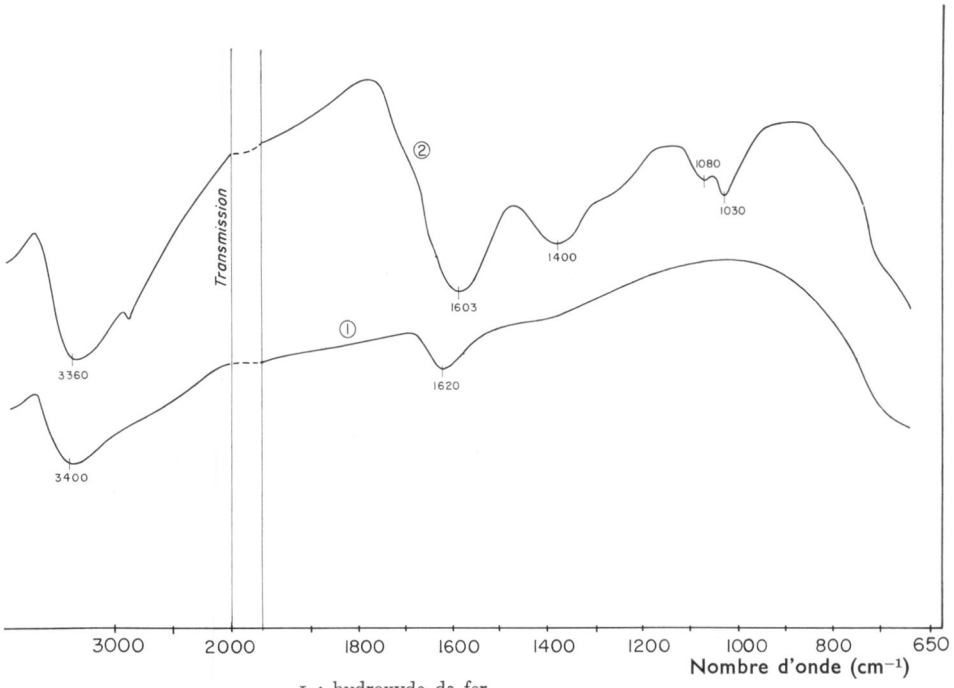


A 1 : hydroxyde d'aluminium
A 2 : acides humiques associés à l'aluminium

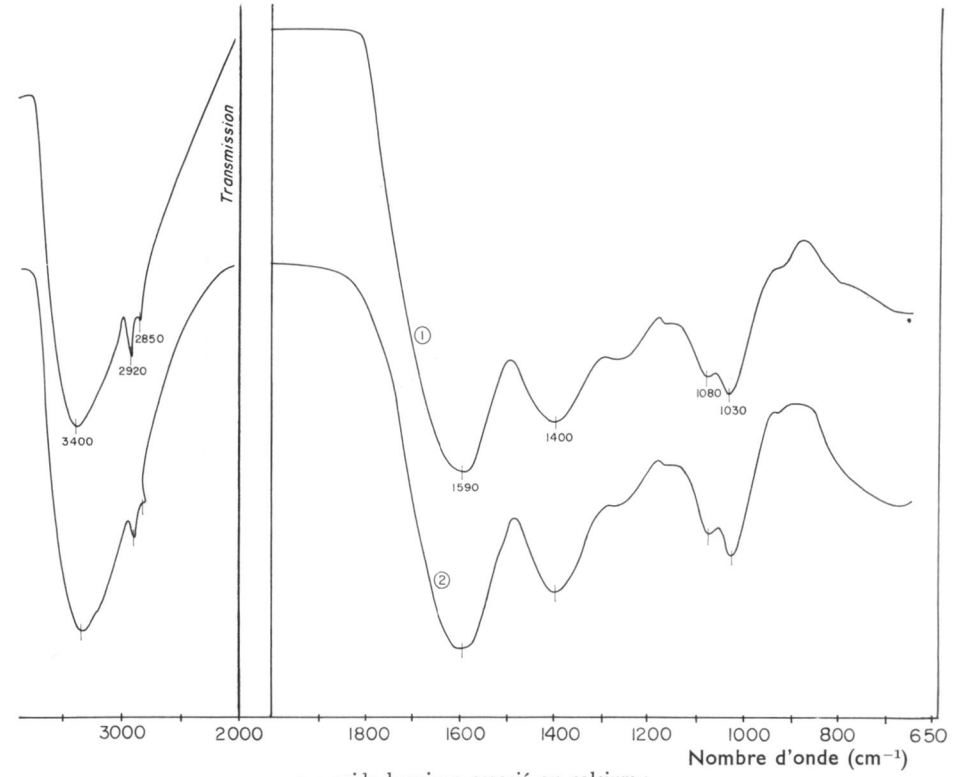


B 1 : hydroxyde de cuivre précipité à partir de chlorure de cuivre
B 2 : acides humiques enrichis en cuivre à partir de chlorure de cuivre

FIG. 4. — *Spectre d'absorption dans l'infrarouge d'acides humiques enrichis avec différents métaux polyvalents à pH 7*



C 1 : hydroxyde de fer
2 : acides humiques associés au fer



D 1 : acide humique associé au calcium ;
2 : acide humique associé au magnésium

FIG. 4 (suite). — *Spectre d'absorption dans l'infrarouge d'acides humiques enrichis avec différents métaux polyvalents à pH 7*

nujol (fig. 5). Les bandes de l'hydroxyde réapparaissent dans le spectre de l'acide humique enrichi avec Cu^{++} à pH 7 ; cependant, on observe un déplacement des bandes situées à 864 et 826 cm^{-1} vers 853 et 817 cm^{-1}, ainsi que l'atténuation des bandes à 984 et 922 cm^{-1} et l'apparition de nouveaux pics à 781 et 697 cm^{-1}. Ces modifications assez remarquables du spectre de l'hydrate de cuivre lorsque ce dernier est associé au composé humique traduisent soit l'existence de liaisons très stables entre fraction minérale et fraction organique, soit l'abondance de certaines fractions humiques absorbant plus particulièrement dans la zone des basses fréquences et qui auraient préférentiellement précipité en présence de $Cu(OH)_2$.

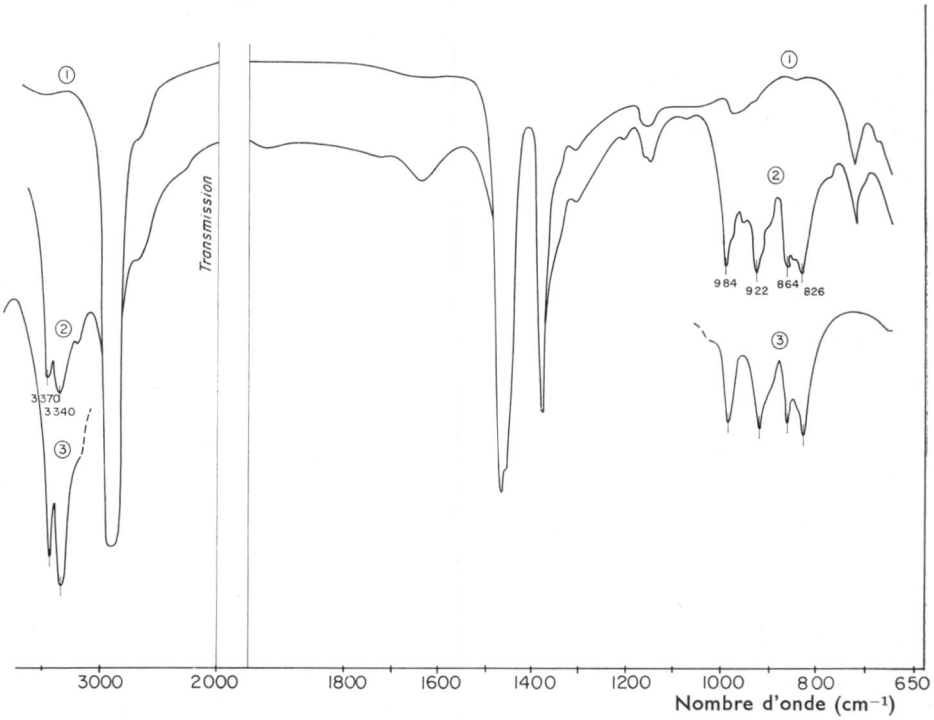


FIG. 5. — *Comparaison des spectres d'absorption infrarouge de l'hydroxyde de cuivre préparé à partir de chlorure de cuivre dans le nujol et dans le bromure de potassium*

1. Nujol
2. Hydroxyde de cuivre dans le nujol
3. Hydroxyde de cuivre dans le KBr

L'acide humique associé au cuivre à pH 7 à partir de sulfate de cuivre fournit un spectre totalement différent de celui ayant fixé du cuivre à ce même pH à partir de chlorure de cuivre (fig. 6). Cette absence totale de similitude ne fait que refléter la différence qui existe entre les spectres des hydrates de cuivre selon qu'on les prépare à partir de chlorure ou de sulfate ; dans le cas du sulfate, on observe en effet la présence des maxima d'absorption à 3 580, 3 390, 3 300, 1 380, 1 110, 1 080, 980, 940, 870, 840, 770, 720 cm^{-1}, qui sont bien caractéristiques de l'hydroxyde puisqu'ils subsistent si l'on remplace le KBr par du nujol. On peut noter que toutes ces

bandes se retrouvent dans l'acide humique ayant fixé Cu^{++} à pH 7, excepté celles situées à 980 et 940 cm^{-1} qui disparaissent, ce qui traduit sans doute la création de liens très stables entre l'hydrate métallique et la fraction organique.

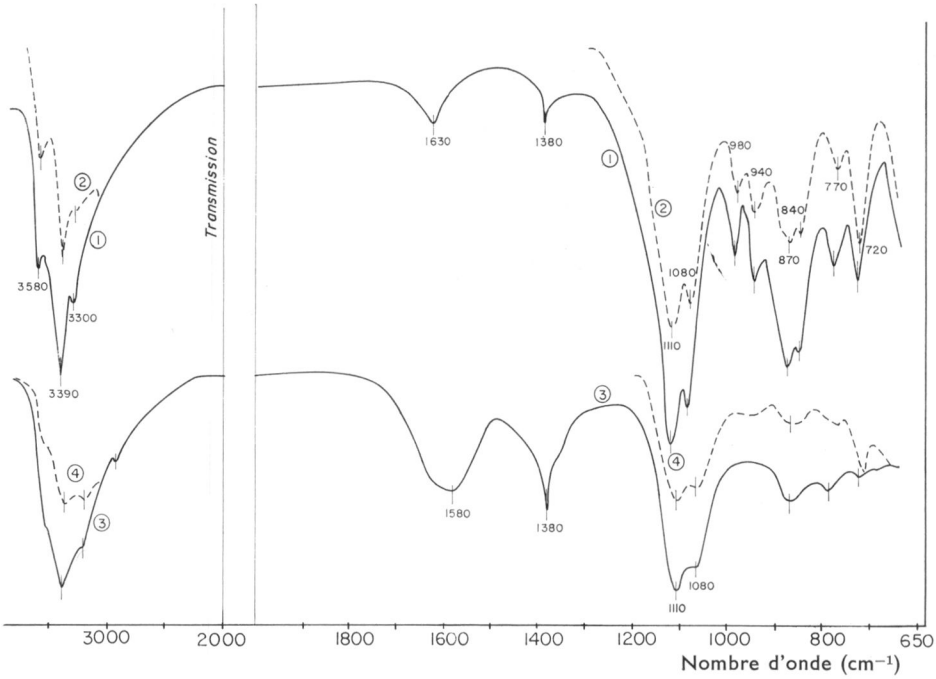


FIG. 6. — *Spectres d'absorption dans l'infrarouge d'hydrate de cuivre et d'acides humiques enrichis en cuivre à pH 7 à partir de sulfate de cuivre*

1. Hydroxyde de cuivre préparé à partir de sulfate de cuivre (KBr)
2. Hydroxyde de cuivre préparé à partir de sulfate de cuivre (nujol)
3. Acides humiques enrichis en cuivre à pH7 à partir de sulfate de cuivre (KBr)
4. Acides humiques enrichis en cuivre à pH7 à partir de sulfate de cuivre (nujol)

C — SOLUBILITÉ DES COMPOSÉS HUMIQUES DANS L'EAU, DANS L'ACIDE ET DANS LA SOUDE

Les tableaux 5, 6 et 7 reproduisent les caractéristiques de chacun des acides humiques avant extraction par les différents réactifs (eau, acide sulfurique N/10, soude 0,5 N), ainsi que les indices de solubilité du carbone et du métal associé aux acides humiques, établis en calculant le pourcentage de chacun de ces deux éléments qui est solubilisé par un réactif donné.

Les observations suivantes peuvent être faites :

1° *Solubilisation par l'eau* (tabl. 5)

Comme on pouvait le prévoir, ce solvant n'extrait que des traces de carbone ; une fraction relativement importante de Ca^{++} et de Mg^{++} passe en solution dans le cas des acides humiques préparés à pH 1, alors que pour pH 7 ce pourcentage est fortement atténué. La solubilisation importante de ces deux métaux, dans le cas des acides humiques qui ont réagi à pH 1, résulte sans doute de la présence dans le

TABLEAU 5

Solubilisation par l'eau des acides humiques et des métaux qui leur sont associés

	Métal	Composition des acides humiques				Indice de solubilité du métal (3)	Indice de solubilité du carbone (3)	C/N du résidu d'extraction
		Métal (1)	Carbone (2)	Azote (2)	C/N			
Acide humique enrichi à pH 1	Cu^{++}	104	420	18,76	23,3	1,1	0	26,4
	Ca^{++}	276	282	12,13	23,2	42,3	0	28,4
	Mg^{++}	51	471	22,75	20,7	53,6	0	22,9
	Al^{+++}	145	352	22,60	15,6	3,7	0	26,2
	Fe^{+++}	121	455	22,02	20,6	0,3	0	29,9
	H^{+}	—	291	17,61	16,5	—	0	—
Acide humique enrichi à pH 7	Cu^{++}	1 417	—	5,00		0,0	0	22,4
	Ca^{++}	209	372	15,46	24,0	10,6	0	26,0
	Mg^{++}	397	394	18,13	21,7	9,0	0	28,1
	Al^{+++}	1 272		7,06		1,5	0	—
	Fe^{+++}	1 031	266	14,80	17,9	1,8	0	25,7

(1) En µéq. pour 100 mg de composé humique.
(2) En mg pour 1 g de composé humique.
(3) Quantité de métal ou de carbone solubilisée (en p. 100 de la quantité initiale).

TABLEAU 6

Solubilisation par l'acide sulfurique N/10 des acides humiques et des métaux qui leur sont associés

(pH du réactif d'extraction : 1,2)

	Métal	Composition des acides humiques				Indice de solubilité du métal (3)	Indice de solubilité du carbone (3)	C/N du résidu d'extraction
		Métal (1)	Carbone (2)	Azote (2)	C/N			
Acide humique enrichi à pH 1	Cu^{++}	91	492	23,96	20,5	87	1,00	20,6
	Ca^{++}	142	422	23,80	17,7	93	0,80	20,2
	Mg^{++}	54	494	28,39	17,4	88	1,50	20,3
	Al^{+++}	173	494	26,04	18,9	55	1,50	20,2
	Fe^{+++}	60	504	27,88	18,0	39	3,50	20,6
	H^{+}	—	509	22,96	22,1	—	—	20,1
Acide humique enrichi à pH 7	Cu^{++}	1 255	97	6,77	14,3	34	3,20	21,6
	Ca^{++}	180	453	20,16	22,4	91	0	22,1
	Mg^{++}	394	461	20,38	22,6	78	0	22,1
	Al^{+++}	1 476	192	10,19	18,8	3	1,70	21,1
	Fe^{+++}	827	287	12,20	23,5	25	1,20	19,1

(1) En µéq. pour 100 mg de composé humique.
(2) En mg pour 1 g de composé humique.
(3) Quantité de métal ou de carbone solubilisée (en p. 100 de la quantité initiale).

composé humique d'une certaine quantité de SO_4H_2, utilisé pour amener le pH à 1 et qui n'a pas été totalement éliminé par les lavages à l'eau qui ont suivi cet enrichissement.

A la suite du traitement par l'eau, on constate que les rapports C/N des acides humiques augmentent : ceci tendrait à prouver que l'analyse ne permet pas d'apprécier l'infime partie du carbone qui passe en solution dans l'eau et que cette infime partie comprend surtout des composés plus particulièrement riches en azote.

2° *Solubilisation par SO_4H_2 N/10* (tabl. 6)

L'indice de solubilité du carbone dans ce réactif est extrêmement faible, celui des métaux est beaucoup plus important et atteint même 100 p. 100 pour Mg^{++} et Ca^{++} dans le cas des composés qui ont réagi avec ces métaux à pH 1 ; les pourcentages de Cu^{++}, Fe^{+++} et Al^{+++} dissous diminuent pour les composés préparés à pH 7 mais ceux de Ca^{++} et Mg^{++} demeurent aussi importants ; l'action dissolvante de SO_4H_2 vis-à-vis des éléments métalliques liés aux acides humiques est donc considérable, particulièrement pour Ca^{++} et Mg^{++} qui sont extraits en quasi totalité.

3° *Solubilisation par NaOH 0,5 N* (tabl. 7)

En ce qui concerne les acides humiques préparés à pH 1, l'indice de solubilité du carbone est à peu près identique pour tous les cations, sauf pour le calcium, l'indice étant de 30 p. 100 pour ce dernier, alors qu'il est de l'ordre de 80 p. 100 pour

TABLEAU 7

Solubilisation par la soude 0,5 N des acides humiques et des métaux qui leur sont associés
(pH du réactif d'extraction : 12,7)

	Métal	Composition des acides humiques				Indice de solubilité du métal (3)	Indice de solubilité du carbone (3)	C/N du résidu d'extraction
		Métal (1)	Carbone (2)	Azote (2)	C/N			
Acide humique enrichi à pH 1	Cu^{++}	91	492	23,96	20,5	86	80,5	35,1
	Ca^{++}	142	422	23,80	17,7	28	29,8	29,3
	Mg^{++}	54	494	28,39	17,4	100	80,3	34,6
	Al^{+++}	173	494	26,04	18,9	71	82,9	35,2
	Fe^{+++}	60	504	27,88	18,0	93	82,4	36,7
	H^{+}	—	509	22,96	22,1	—	82,7	27,0
Acide humique enrichi à pH 7	Cu^{++}	1 255	97	6,77	14,3	35	48,4	20,5
	Ca^{++}	180	453	20,16	22,4	30	32,4	35,4
	Mg^{++}	394	461	20,38	22,6	26	55,4	24,4
	Al^{+++}	1 467	192	10,19	18,8	100	73,0	29,7
	Fe^{+++}	827	287	12,20	23,5	28	77,3	29,1

(1) En µéq pour 100 mg d'acide humique.
(2) En mg par g de composé humique.
(3) Quantité de métal ou de carbone solubilisée (en p. 100 de la quantité initiale).

tous les autres. Dans le cas des acides humiques préparés à pH 7, l'indice de solubilité du carbone est abaissé assez sensiblement pour Cu^{++} et Mg^{++} et beaucoup moins pour Al^{+++} et Fe^{+++} ; pour ce pH, c'est encore le carbone lié à Ca^{++} qui apparaît comme le moins soluble dans la solution sodique.

La solubilisation des métaux est importante dans le cas où la fixation s'est effectuée à pH 1 ; en raison du pH très élevé de la solution sodique (12,7), on doit admettre que tout le métal contenu dans les composés humiques est associé à ces derniers et demeure dans cet état au cours de l'extraction. Ce résultat ne s'applique pas au calcium, dont le pourcentage qui passe en solution est plus faible, de l'ordre de grandeur du pourcentage de carbone qui est solubilisé dans les mêmes conditions. Pour pH 7, les pourcentages de solubilisation des différents métaux sont beaucoup plus faibles ; il est vraisemblable que, dans ce cas, seules les fractions métalliques liées aux substances organiques passent en solution en même temps que ces dernières car, au pH auquel a lieu l'extraction (12,7), on ne peut envisager une solubilisation des hydrates métalliques qui ont précipité indépendamment des acides humiques. Une exception doit être faite cependant pour Al^{+++}, dont l'hydrate passe totalement en solution à ce pH sous forme d'ions aluminates.

L'augmentation du rapport C/N des résidus d'extraction est extrêmement nette, sauf pour l'acide humique non enrichi en métal ; cela signifie que la solubilisation par la soude intéresse plus particulièrement les composés humiques les plus riches en azote, ce phénomène s'accentuant pour les composés organiques associés aux différents métaux.

4° *Solubilisation par des solutions sodiques de normalités croissantes* (tabl. 8)

Les indices de mobilité du carbone des composés enrichis en Ca^{++} à pH 1 ne dépassent pas 50 p. 100 pour le réactif le plus alcalin (NaOH 0,5 N, pH 12,7) alors que, pour les composés homologues enrichis en fer, la solubilisation atteint 86 p. 100 dès pH 9,2. L'indice de solubilité demeure inférieur à 26 p. 100 pour les acides humiques enrichis en Ca^{++} à pH 7 mais il s'élève à 91 p. 100 quand on extrait le calcium par un traitement préalable avec SO_4H_2 0,1 N.

III. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'entraînement simultané vers l'anode, au cours de l'électrophorèse, d'une partie des composés humiques et des métaux qui leur sont liés est un phénomène déjà signalé par de nombreux auteurs (Alexandrova, 1960 ; Mortensen, 1961 ; Titova, 1962 ; Mücke et Kleist, 1965 ; Jacquin et Saas, 1965 ; Delas, 1966 ; Juste, 1966) ; cette migration est généralement attribuée à la formation de complexes organo-métalliques négativement chargés, suffisamment stables pour résister à l'action dissociante du tampon alcalin et du champ électrique. Les expériences précédentes ne font que confirmer ce résultat, mais en précisant que les possibilités d'entraînement des différents cations dépendent essentiellement de la nature de ces derniers ; le calcium et le cuivre s'avèrent comme les métaux les plus mobiles, au moins dans le cas où la

TABLEAU 8

Solubilisation des acides humiques et des métaux qui leur sont liés par des solutions de soude de normalités croissantes

Acide humique enrichi à pH :	Métal	Composition des acides humiques				Solution d'extraction (NaOH)	pH de la solution d'extraction après contact avec le composé humique	Indice de solubilité du métal (3)	Indice de solubilité du carbone (3)	C/N du résidu d'extraction
		Métal (1)	Carbone (2)	Azote (2)	C/N					
1	Ca^{++}	128	487	22,74	21,4	N/100 N/50 0,5 N	6,9 10,8 12,7	40,3 60,0 48,8	22,7 52,0 50,2	22,8 42,9 26,8
7	Ca^{++}	240	462	20,22	22,8	N/100 0,5 N 0,5 N *	11,5 12,7 12,7 *	12,2 30,2	11,0 26,3 91,5 *	24,0 27,3 8,0 *
1	H^{+}		527	25,14	21,0	N/50 0,5 N	9,7 12,7	— —	89,2 98	17,2 5,8
1	Fe^{+++}	88	527	24,47	21,5	N/50 0,5 N	9,2 12,7	88 92	86,6 91,3	16,9 13,0
7	Fe^{+++}	699	353	16,24	21,7	N/100 0,5 N	9,5 12,7	15,5 18,5	21,8 68,4	24,6 39,2

(1) En µéq. pour 100 mg de composé humique.
(2) En mg pour 1 g de composé humique.
(3) Quantité de métal ou de carbone solubilisé (en p. 100 de la quantité initiale).
* Composé humique préalablement traité par SO_4H_2 N/10.

fixation sur les composés humiques s'est effectuée à un pH nettement acide (pH 1) excluant la possibilité de formation d'hydrates. Lorsque la fixation s'effectue à un pH plus élevé (pH 7), il y a, pour certains métaux (Cu^{++}, Al^{+++}, Fe^{+++}), formation d'hydrates qui précipitent en entraînant avec eux les composés humiques qui leur sont liés ; ces liaisons ne sont pas rompues au cours de l'électrophorèse, puisqu'il y a à la fois immobilisation du métal et des composés humiques qui leur sont associés au niveau de la dépose. Pour Ca^{++} et Mg^{++}, il n'est évidemment pas possible d'expliquer par un mécanisme comparable la coprécipitation à pH 7 de ces métaux et des composés humiques, car on se trouve à un pH nettement inférieur à celui où commencent à précipiter les hydrates correspondants ; il est vraisemblable que, dans ce cas, la saturation par Ca^{++} et Mg^{++} des fonctions carboxyliques des composés humiques atténue fortement le caractère hydrophile de ces derniers et entraîne leur insolubilisation partielle.

Le fait que les composés humiques associés aux métaux à pH 7 ou à pH 1 possèdent des comportements électrophorétiques nettement différents malgré la présence d'un tampon qui devrait tendre à uniformiser ces comportements, apporte une preuve supplémentaire de la stabilité des complexes organo-métalliques formés et souligne le caractère relativement durable de cette propriété qui leur a été conférée par les conditions de préparation. Dans ces conditions, il devient possible d'admettre que la mobilité électrophorétique des acides humiques puisse constituer un reflet de leur aptitude à se déplacer dans le sol.

Les expériences précédentes démontrent également que les électrophorégrammes obtenus à partir d'un même composé humique diffèrent considérablement entre eux, selon la nature du cation polyvalent associé à ce composé ; elles contribuent donc à mieux fixer les limites de l'électrophorèse en tant que technique de caractérisation des composés humiques qui ne ferait intervenir que la dimension des polymères.

L'étude des spectres d'absorption dans l'infrarouge confirme les résultats obtenus par Schnitzer et Skinner (1963, 1964, 1965) : les groupements carboxyliques semblent jouer un rôle prépondérant dans les liaisons contractées entre fraction minérale et fraction organique ; les modifications observées à la suite de l'enrichissement en métal sont en effet identiques à celles qui se produisent quand on provoque une dissociation de ces groupements par l'addition d'une base forte ; le nombre de groupements carboxyliques intéressés par ces liaisons dépend de la nature du métal, le fer semblant se lier plus étroitement que les autres métaux (Juste, 1966), ce qui est surtout apparent à pH 1. L'examen des spectres des acides humiques ayant fixé les métaux à pH 7 indique que les liaisons contractées peuvent être suffisamment fortes pour modifier le spectre de la phase minérale (cas de l'hydroxyde de cuivre).

L'étude de la solubilisation, par différents réactifs, des composés humiques associés aux métaux apporte des éléments nouveaux ; elle souligne le comportement très particulier des acides humiques ayant réagi avec le calcium, qui résistent beaucoup mieux que les autres à la solubilisation par un réactif très alcalin comme la soude 0,5 N (pH 12,7). Ce comportement particulier paraît difficilement conciliable avec les observations faites au cours des expériences d'électrophorèse et de solubilisation par l'eau des composés humiques séparés à l'aide de cette technique : on observe effectivement dans ce cas-là que le calcium n'affecte que très peu la mobilité

électrophorétique et la solubilité dans l'eau des composés humiques auxquels il est associé. Il semble bien cependant que cette contradiction ne soit qu'apparente si l'on tient compte du fait que les expériences d'électrophorèse ont été réalisées dans des conditions où le calcium existe à l'état ionique alors que la solubilisation par la soude 0,5 N s'effectue à un pH nettement plus alcalin, supérieur au seuil de précipitation de l'hydrate de calcium ; le comportement du calcium s'expliquerait alors par le fait que la solubilité des composés humiques associés à l'hydroxyde serait très différente de celle des composés associés à l'ion métallique.

Cette limitation de la solubilité dans un réactif nettement alcalin des composés humiques lorsqu'ils sont associés à des hydrates de calcium ne se manifeste pas quand ces mêmes composés sont associés à Al^{+++}, à Fe^{+++} ou à leurs hydroxydes ; il est vraisemblable que, dans ce cas, les composés humiques sont détachés des hyhydroxydes par simple échange anionique ou bien solubilisés en entraînant avec eux une partie de la fraction métallique qui leur est liée.

Le passage en solution dans la soude 0,5 N d'une fraction non négligeable des métaux associés aux composés humiques à pH 7 (notamment de Cu^{++}, Fe^{+++} et Al^{+++}) et l'absence quasi totale de mobilité de ces métaux au cours de l'électrophorèse dans un tampon de pH 9,2 peuvent paraître contradictoires : il est en effet évident que, contrairement à Al^{+++} qui donne naissance à des ions aluminates en milieu très alcalin, Cu^{++} et Fe^{+++} ne peuvent être solubilisés à pH 12,7 que parce qu'ils demeurent liés aux acides humiques au cours de l'extraction de ces derniers ; dans ces conditions, on aurait pu penser que, dans un milieu de pH 9,2 (tampon utilisé pour l'électrophorèse), l'ionisation de ces acides humiques se serait produite, provoquant ainsi le déplacement d'une partie de la fraction métallique engagée dans les complexes organo-métalliques vers la région anodique. En fait, si ce déplacement ne se produit pas au cours de l'électrophorèse cela signifie soit que la charge globale des complexes préparés à pH 7 est nulle, soit que les forces de frottement exercées sur le papier par les hydroxydes métalliques précipités au niveau de la dépose sont trop fortes pour être vaincues par le champ électrique ; toutefois, il est également possible que cette différence de comportement des complexes dans la soude 0,5 N et dans le tampon utilisé pour l'électrophorèse résulte de réactions d'hydrolyse alcaline qui se produiraient en présence de soude 0,5 N et qui entraîneraient l'apparition de nouveaux radicaux carboxyliques, dont la dissociation favoriserait le passage en solution des composés humiques et des métaux qui leur sont associés.

L'élévation des rapports C/N des résidus d'extraction des acides humiques ayant fixé les métaux constitue un fait d'observation important ; les valeurs de ces rapports sont difficilement interprétables quand le réactif d'extraction a dissous la majeure partie des substances organiques, l'erreur relative commise sur les déterminations de C et de N étant très importante ; mais lorsque l'on dissout moins de composés humiques, l'élévation du rapport C/N dans les résidus demeure un fait indiscutable. Cette augmentation, qui paraît d'autant plus nette que s'élève la normalité de la soude utilisée, c'est-à-dire au fur et à mesure que s'accentue le caractère insoluble du résidu d'extraction, apporte peut-être une preuve supplémentaire à l'hypothèse attribuant un rôle déterminant aux radicaux carboxyliques dans la formation de liens très stables entre fraction organique et fraction minérale ; elle peut cependant être également interprétée comme résultant de l'existence de composés organo-métalliques dont la solubilité ne serait pas sans rapport avec leur teneur en azote.

IV. — CONCLUSION

Dans la mesure où l'on admet que la mobilité d'un acide humique dans un champ électrique constitue un reflet de son aptitude à se déplacer dans les conditions du milieu naturel, les expériences décrites montrent que cette aptitude au déplacement est sous la dépendance étroite de la nature des métaux polyvalents qui se sont fixés sur cet acide humique ; l'aluminium s'avère à cet égard comme un agent d'immobilisation particulièrement efficace alors que le calcium, tout au moins lorsqu'il se trouve à l'état ionique, n'affecte que très peu cette aptitude au déplacement. Il faut souligner que ces résultats s'appliquent aux acides humiques proprement dits et non pas à des formes beaucoup moins polymérisées comme les acides fulviques dont le rôle dans la dynamique des métaux polyvalents du sol serait, d'après de nombreux auteurs, particulièrement important.

Lorsque l'alcalinité du milieu devient très forte, c'est-à-dire, lorsqu'on se place dans les conditions d'extraction des acides humiques du sol, l'influence des différents métaux ne se manifeste plus de la même manière : la matière organique liée à Al^{+++}, Fe^{+++}, Cu^{++} ou Mg^{++} est alors en grande partie mobilisée en même temps qu'une fraction importante des métaux qui lui sont associés. Pour Al^{+++} et Fe^{+++}, ces résultats confirment donc l'hypothèse de KAHN (1959) selon laquelle les réactifs alcalins extrairaient la totalité des composés humiques liés à la fraction minérale par l'intermédiaire de ces métaux. Par contre, les réactifs d'extraction nettement alcalins doivent limiter les quantités d'acides humiques que l'on peut extraire dans le cas où ces derniers sont surtout liés au calcium, cette limitation disparaissant quand le sol est traité au préalable par un acide minéral qui élimine le cation ; ce résultat n'est pas conforme à une hypothèse émise également par KAHN (1959) : cet auteur pense en effet que le pré-traitement par les acides minéraux ne favoriserait pas la solubilisation du calcium, mais provoquerait par hydrolyse acide une dépolymérisation des composés humiques favorisant leur extraction ultérieure par la soude. Quoi qu'il en soit, il semble que, dans le cas où l'on effectue un traitement préalable du sol par un acide minéral, la présence de cations polyvalents dans les composés humiques ne puisse limiter la solubilité de ces derniers dans les réactifs très alcalins utilisés dans l'analyse des sols et, par conséquent, ne permette de fournir une solution au problème de la nature de l'humine. Il convient cependant de souligner que certains types d'associations organo-minérales du sol, telles que celles existant entre composés humiques et argiles et qui peuvent avoir une influence déterminante sur l'extractibilité de ces composés, n'ont pas été envisagés au cours de cette étude.

Reçu pour publication en mars 1967.

SUMMARY

INFLUENCE OF THE ADDITION OF ALUMINIUM, IRON, CALCIUM, MAGNESIUM OR COPPER ON THE ELECTROPHORETIC MOBILITY, THE INFRA-RED SPECTRUM AND THE SOLUBILITY OF A HUMIC COMPONENT

On humic acids, extracted from the surface horizon of a humoferruginous podzol developed on quartz sand, a variety of polyvalent metals (Al^{+++}, Fe^{+++}, Cu^{++}, Mg^{++}, Ca^{++}), were fixed at pH 1 and pH 7. The infrared spectra of the organo-metallic complexes thus obtained bring out the

intervention of the carboxylic groupings in the bonds contracted between metal fraction and organic fraction (fig. 2).

In the case in which the fixation occurred at pH 7, most of the metals greatly diminish the electrophoretic mobility of the humic acids, the most effective immobilizing agent proving to be aluminium and calcium the least effective (fig. 1). The solubility in water and in sulphuric acid N/10 of the enriched humic acids is extremely slight, but the solubility in NaOH 0,5 N is very high in the case in which humic acids have fixed Al^{+++}, Fe^{+++}, Mg^{++} or Cu^{++}, an important fraction of the metal remaining associated with the humic components in the course of the solubilization of the latter. Calcium is characterized by a very special behaviour, the solubility in NaOH 0,5 N of the humic components linked to this cation being very low (tabl. 7 and 8).

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS VON ALUMINIUM-, EISEN-, CALCIUM-, MAGNESIUM- ODER KUPFERZUGABE AUF DIE ELEKTROPHORETISCHE MOBILITÄT, AUF DAS INFRAROT-ABSORPTIONSSPEKTRUM UND AUF DIE LÖSLICHKEIT EINER HUMUSSÄURE-VERBINDUNG

Es wurden auf Huminsäuren, die aus der obersten Schicht eines humus-eisenhaltigen, auf quarzhaltigen Sand entwickelten Podzols extrahiert waren, verschiedene mehrwertigen Metalle (Al^{+++}, Fe^{+++}, Cu^{++}, Mg^{++}, Ca^{++}) bei pH = 1 und pH = 7 fixiert. Die Infrarot-Spektren der so erhaltenen metallorganischen Komplexe unterstreichen die Intervention Karboxyl-Gruppen bei den Bindungen zwischen der metallischen Fraktion und der organischen Fraktion (Abb. 2). Im Falle der Fixierung bei pH = 7, wird die elektrophoretische Mobilität der Huminsäuren durch die meisten Metalle stark herabgesetzt, wobei sich Aluminium als das wirksamste und Calcium als das am wenigsten wirksame Fixierungsmittel erwies. (Abb. 1) Die Löslichkeit in Wasser und in Schwefelsäure N/10 der angereicherten Huminsäuren ist äusserst schwach, aber die Löslichkeit im Natron 0,5 N ist im Falle der Fixierung von Al^{+++}, Fe^{+++}, Mg^{++} oder Cu^{++} and die Huminsäuren besonders stark, da eine bedeutende Fraktion des Metalles mit den Huminsäurenverbindungen während ihrer Lösung verbunden bleibt. Calcium zeigt dabei ein ganz besonderes Verhalten mit einer sehr schwachen Löslichkeit in Natron 0,5 N der an dieses Kation gebundenen Huminsäureverbindungen. (Abb. 7 und 8).

Влияние добавления алюминия, железа, кальция, магния или меди на электрофоретическую подвижность инфра-красного спектра поглощения и растворимость гуминовых кислот.

К. ЖЮСТ, Ж. ДЕЛЯ.

РЕЗЮМЕ

На гуминовые кислоты извлеченные из поверхностного горизонта гуминово-железистого подзола, образовавшегося над кварцевым песком, авторы закрепляли разные поливалентные металлы (Al^{+++}, Fe^{+++}, Ca^{++}, Mg^{++}, Cu^{++}) при кислотностях pH = 1 и pH = 7. Полученные инфра-красные спектры метало-органических комплексов явно указывают на вмешательство карбоксильных групп в связи существующие между металлической и органической фракциями (рис. 3). В случаях когда закрепление протекает при pH = 7, большая часть металлов сильно ослабляет электрофоретическую подвижность гуминовых кислот, при чем алюминий является самым эффективным, а кальций — наименее сильным элементами закрепления (рис. 1). Растворимость в воде и в разбавленной серной кислоте (N/10) обогащенных гуминовых кислот — очень слабая, но

растворимость в слабом растворе гидроокиси натрия (0,5 N) особенно сильна в случаях закрепления гуминовыми кислотами Al^{+++}, Fe^{+++}, Mg^{++} и Cu^{++}, когда крупная фракция металла остается связанной с гуминовыми соединениями при их растворении в вышеуказанных веществах. Кальций характеризуется совершенно особым поведением; растворимость гуминовых соединений связанных с этим катионом, в слабом растворе гидроокиси натрия (0,5 N) — весьма слаба.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALEXANDROVA L. N., 1960. On the composition of humus substances and the nature of organo-mineral colloids in soil. 7 *Congr. Internation. Sci. Sol*, **2**, 74-81.

ANSTETT A., 1956. Sur une méthode rapide de détermination du rapport C/N dans les sols, les amendements organiques et les végétaux. 6 *IV*e *Congr. Sci. Sol*, B, 693-699.

COLTHUP N. B., 1950. Spectra structure correlations in the infrared regions. *J. Opt. Soc. Amer.*, **40**, 397-400

COPPENET M., DUCET G., CALVEZ J., BATS J., 1954. Microdosage colorimétrique du cuivre dans les végétaux par la 2-2'-diquinoléine. *Ann. agron.*, **4**, 597-600.

DELAS J., 1966. Étude des rapports entre cuivre et matière organique dans un podzol humo-ferrugineux accidentellement enrichi en cuivre. *C. R. Acad. Sci.*, **262**, 2688-2691.

DUCHAUFOUR Ph., JACQUIN F., 1963. Recherche d'une méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques contrôlée par l'électrophorèse. *Ann. agron.*, **14**, 885-918.

HILL U. T., 1956. Direct photometric determination of aluminium in iron ores. *Anal. Chem.*, **28**, 1419-1424.

JACQUIN F., 1963. *Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques.* Thèse, Nancy.

JACQUIN F., SAAS A. 1965. Étude, à l'aide de radioisotopes, des liaisons organominérales formées par le acides humiques et le calcium. *C. R. Acad. Sci.*, **261**, 489-49.

JUSTE C., 1966. Modifications de la mobilité électrophorétique et du spectre infrarouge d'un acide humique artificiellement enrichi en fer ou en aluminium. *C. R. Acad. Sci.*, **262**, 2692-2695.

KHAN D. V., 1959. The composition of organic substances and their relationship to the mineral portion of the soil. *Soviet Soil Sci.*, 7-14.

LAWSON K. E., 1961. *Infrared absorption of inorganic substances.* Reinhold Publishing Corporation.

MAZOYER R., 1958. Sur une nouvelle méthode colorimétrique du dosage du cuivre dans les plantes. *Ann. agron.*, 299-300.

MELOCHE V. W., KALBUS G. E., 1958. Anomalies in the infrared spectra of inorganic compounds prepared by the potassium bromide pellet technique. *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **6**, 104-111.

MORTENSEN J. L., 1963. Complexing of metals by soils organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 179-186.

MÜCKE D., KLEIST H., 1965. Papierelektrophoretische Untersuchungen an Huminsaüre Metallverbindungen. *Albrecht Thaer Arch.*, **9**, 327-336.

ORLOV D. S., ROZANOVA O. N., MATYUKHINA S. G., 1962. Infrared absorption spectra of humic acids. *Soviet Soil Sci.*, 15-21.

SANDELL E. B., 1959. *Colorimetric determination of trace of metals.* Intern. Sci. Publishers Inc. New York.

SCHNITZER M., SKINNER S. I. M., 1963. Organo-metallic interactions in soils : I. Reaction between a number metal ions and the organic matter of a podzol B*h* horizon. *Soil Sci.*, **96**, 86-93.

SCHNITZER M., SKINNER S. I. M., 1963. Organo-metallic interactions in soils : II. Reaction between different forms of iron and aluminium and the organic matter of a podzol B*h* horizon. *Soil Sci.*, **96**, 181-186.

SCHNITZER M., SKINNER S. I. M., 1964. Organo-metallic interactions in soils : III. Properties of iron and aluminium-organic matter complexes, prepared in the laboratory and extracted from a soil. *Soil Sci.*, **98**, 197-203.

SCHNITZER M., SKINNER S. I. M., 1965. Organo-metallic interactions in soils : IV. Carboxyl and hydroxyl group in organic matter and metal retention. *Soil Sci.*, **99**, 278-284.

TITOVA N. A., 1962. Iron humus complexes of certain soils. *Soviet Soil Sci.*, 1351-1356.

Ann. agron., 1967, **18** (4), 429-444.

MISE AU POINT BIBLIOGRAPHIQUE

LA DIFFUSION DANS LES SYSTÈMES ARGILE-EAU

Deuxième partie : Diffusion des cations

R. CALVET

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles

SOMMAIRE

La diffusion des cations dans les systèmes argile-eau : application de la théorie des vitesses absolues de réaction et étude des différents facteurs qui conditionnent la mobilité des ions.

La première partie de cet exposé a été consacrée au rappel de quelques données théoriques concernant les phénomènes de diffusion :

La deuxième partie aura pour objet l'étude de la diffusion des cations dans les systèmes argile-eau. La seule théorie qui peut être appliquée facilement est la théorie des vitesses absolues de réaction (P. D. Eyring, 1941), dans laquelle le coefficient de diffusion D s'exprime par la formule :

$$D = e\,\lambda^2\,\frac{kT}{h}\,\exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right)\exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = D_0\exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \qquad (1)$$

e : base des logarithmes ;
λ : distance de saut ;
h : constante de Planck ;
k : constante de Boltzmann ;
T : température absolue
ΔS : variation d'entropie ;
R : constante moléculaire des gaz ;
E : énergie d'activation.

I. — DIFFUSION ET DISTANCE DE SAUT

Une estimation numérique de λ peut être obtenue par l'examen des propriétés structurales du milieu. Le terme D_0 permet alors de calculer ΔS. Ce dernier paramètre est plus difficile à estimer. Dans le cadre de certaines hypothèses, il est possible de lui donner une valeur, ce qui permet de calculer λ.

A — *Recherche des valeurs de λ par l'étude du milieu*

On sait que l'existence des défauts de réseau dans les cristaux permet de définir des sites privilégiés, c'est-à-dire des positions pour lesquelles l'énergie de la particule diffusante est minimum. La localisation de ces sites étant connue, différents chemins de diffusion peuvent être décrits (W. JOST, 1960). Dans les systèmes argile-eau, on peut rechercher de telles positions et les identifier à des sites privilégiés.

La surface d'un feuillet d'argile, constituée par des atomes d'oxygène, n'est pas une surface plane. Elle présente des cavités hexagonales dues à la structure cristallographique du réseau, et des trous délimités par des atomes d'oxygène adjacents. On peut alors concevoir, d'une façon générale, que toutes les particularités topographiques de la surface pourront jouer le rôle de sites privilégiés. Permettant aux cations de se rapprocher des charges négatives du réseau, elles constituent des positions pour lesquelles leur énergie potentielle passe par un minimum. Dans ces conditions, il est logique en première analyse, de prendre pour distance de saut des distances qui séparent ces positions. Pour la montmorillonite, par exemple, des distances de l'ordre de 10 et 5 Å séparent deux cavités hexagonales situées près d'une substitution isomorphique et deux cavités hexagonales quelconques. Ces valeurs particulières que l'on peut déterminer dépendent des propriétés structurales du minéral. Elles peuvent se définir indépendamment de tout phénomène de diffusion. Une telle attitude suppose que l'on admette que la diffusion des cations s'effectue par des sauts successifs de sites en sites.

Cette évaluation de λ n'est pas suffisante car elle ne tient pas compte de la présence des molécules d'eau et des autres ions. Quand l'argile est très faiblement hydratée, les cations sont très près de la surface du minéral et le rôle de celle-ci doit être dominant. Quand la teneur en eau est élevée les cations sont plus loin de la surface et l'action des charges du réseau devient moins marquée. La figure 1 montre la variation de l'énergie potentielle d'un cation qui se déplace dans des plans distants de 1 et 4 Å de la surface de l'argile.

L'énergie potentielle est calculée sur la base de l'interaction cation-charge négative.

Dans le plan situé à 1 Å de la surface, il est relativement aisé de définir une distance de saut par la distance AB qui sépare deux minima de l'énergie potentielle. Quand on considère des plans plus éloignés de la surface, les minima sont de moins en moins marqués (pour les cations, tout se passe comme si la charge de l'argile était uniformément répartie) et il devient de plus en plus difficile de définir λ en fonction des propriétés structurales de l'argile.

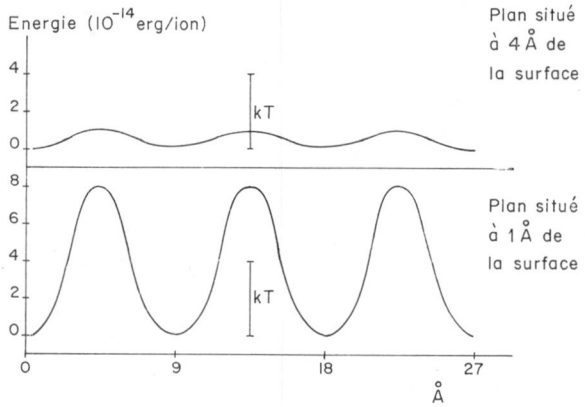


FIG. 1. — *Distributiou du potentiel et de la charge près de la surface de la montmorillonite.* Les charges du réseau sont localisées à 9, 18 et 27 Å (d'après SHAINBERG I. et KEMPER W. D., 1967)

Quand le système hydraté contient des sels libres en excès, deux faits supplémentaires apparaissent :

1. Les cations qui saturent l'argile peuvent être très éloignés de la surface. G. BOLT (1963) estime que dans une suspension de montmorillonite, les ions se répartissent de la façon suivante :

Montmorillonite Na : 50 p. 100 des ions Na^+ jusqu'à 4 à 5 Å de la surface

Montmorillonite Ca : 75 p. 100 des ions Ca^{++} jusqu'à 4 à 5 Å de la surface

(ces chiffres sont valables pour des concentrations en électrolyte ne dépassant pas 0,1 N).

2. Il existe un échange constant entre les ions libres et ceux qui compensent la charge de l'argile. Le flux total de diffusion est la somme du flux correspondant à la diffusion de surface et du flux correspondant à la diffusion en solution.

Dans ce cas, il devient difficile de définir une distance de saut par la recherche de sites privilégiés. Les positions pour lesquelles l'énergie des cations est minimum sont déterminées par l'ensemble des propriétés du minéral, de l'eau, des autres ions et des cations eux-mêmes. La distance λ devient une fonction de plusieurs facteurs d'importance probablement équivalente alors que dans un système peu hydraté, la structure de l'argile est le facteur prépondérant.

Malgré les restrictions que l'on peut faire, il est possible d'utiliser les valeurs de λ fixées *a priori* pour calculer ΔS. Les résultats obtenus peuvent alors s'expliquer par l'analyse des conséquences des interactions qui existent entre les cations et les molécules d'eau (voir chap. II, C).

B — *Obtention des valeurs de λ par application de la formule de Eyring*

De la formule (1) on tire :

$$\lambda = \sqrt{\frac{D_0\, h}{k\, Te} \exp\left(-\frac{\Delta S}{R}\right)} \quad \text{avec } D_0 = D.\exp\left(\frac{E}{RT}\right)$$

ΔS est la variation d'entropie qui accompagne le passage du cation de l'état initial (un site) à l'état activé (on peut admettre qu'il correspond à la position occupée par le cation lorsqu'il se trouve à mi-chemin entre deux sites). Pour un système argile-eau, on ne sait pas calculer ce paramètre et on ne sait pas en obtenir une mesure expérimentale. Devant ces difficultés, certains auteurs ont été conduits à admettre que ΔS est une constante qui entre dans l'expression de la fréquence de vibration des atomes de surface. Ce point sera précisé et discuté ultérieurement. Il suffit de considérer pour l'instant que, cette hypothèse étant posée, des valeurs de λ peuvent être calculées. T. M. LAI et M. M. MORTLAND (1960), ont trouvé pour des suspensions de montmorillonite :

Cation	p. 100 d'argile (poids)	λ Å
Na^+	8,9	24,8
	12,9	10,6
	15,2	3,0
Ca^{++}	17,9	931,0
	23,9	307,0
	28,0	135,0

D'autres expériences ont été effectuées sur des systèmes peu hydratés (J. CHAUSSIDON, R. CALVET, 1966):

Argile : Montmorillonite	Cation : Na^+
Teneur en eau p. 100 du poids sec	λ Å
5	10,8
7,5	4,25
10,5	4,38
12,5	1,98
15	1,43
17,5	1,58

Ces résultats nécessitent plusieurs remarques :

1° Les valeurs de λ sont très variables, mais leur ordre de grandeur est plausible. Les valeurs trouvées pour le calcium sont anormalement grandes. On peut penser qu'elles caractérisent plus les propriétés d'un gel que les propriétés des particules d'argile. Dans un gel d'argile calcique, la diffusion est peut-être plus limitée par le passage d'un agrégat à un autre que par le déplacement sur la surface du feuillet.

2° Pour les faibles teneurs en eau, les valeurs trouvées correspondent à celles que l'on peut déterminer en examinant la structure de l'argile. Ceci pourrait signifier que la variation d'entropie est moins importante dans les systèmes peu hydratés et que dans ce cas, c'est le minéral qui fixe la valeur de λ.

La théorie de Eyring ne permet donc pas de faire un choix. Il faut que son utilisation s'accompagne d'une étude détaillée des propriétés du milieu. En effet, ce sont celles-ci qui déterminent la distance de saut, comme elles conditionnent la mobilité des cations.

II. — LES FACTEURS QUI CONDITIONNENT LA MOBILITÉ DES CATIONS

A — *Diffusion et fréquence de saut*

On décrit le phénomène de diffusion par le saut d'un cation d'une position à une autre. Ces positions distantes de λ, sont celles pour lesquelles l'énergie du cation est minimum. La diffusion est d'autant plus rapide que le nombre de sauts effectués par unité de temps est grand ou que le temps τ mis pour changer de position est plus faible. Une valeur élevée du coefficient de diffusion correspond à une valeur élevée de la fréquence $\Gamma = \frac{1}{\tau}$.

La formule (1) peut s'écrire :

$$D = \lambda^2 \Gamma = \lambda^2 \Gamma_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

avec

$$\Gamma_0 = e \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right)$$

A l'occasion du calcul de λ, on a admis que ΔS était une constante. Cela revient donc à poser que Γ_0 est aussi une constante. On utilise fréquemment une approximation due à J. H. De Boer (1953). Cet auteur donne l'expression suivante du coefficient de diffusion de surface des atomes ou des molécules d'un gaz adsorbé :

$$D = \frac{1}{4} \lambda^2 \Gamma' \quad \text{avec } \Gamma' = \Gamma'_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

$$D = \frac{\lambda^2}{4} \Gamma'_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

Γ'_0 : fréquence de vibration Debye. Elle est de l'ordre de 10^{+13} sec^{-1}.

Le facteur $\frac{1}{4} \Gamma'_0$ est la constante qui contient ΔS.

Appliquer ces considérations à la diffusion des cations dans les systèmes argile-eau est assez discutable, d'autant plus que la fréquence Γ'_0 est très mal définie dans ce cas. Il en résulte que les valeurs de λ que l'on trouve par application de la formule (1) doivent être avancées avec prudence.

La fréquence de saut dépend aussi de l'énergie d'activation du phénomène, c'est-à-dire de la hauteur de la barrière de potentiel qui s'oppose au déplacement des cations. La mobilité de ceux-ci est une fonction de leur taille, de leur charge et de leur polarisabilité. Elle est également sous la dépendance des contraintes diverses que les cations subissent lors d'un déplacement.

B — *Interactions Cation-Réseau*

Elles sont constituées par des effets électriques et par des effets géométriques.

1. *Effets électriques.*

L'attraction coulombienne des cations par le réseau est l'effet principal. Elle dépend de la distance entre les cations et les charges négatives, et de la charge des cations. Plus ces derniers sont proches de la surface, plus l'attraction est forte (fig. 1). Il en résulte qu'un cation se déplace d'autant plus facilement qu'il est éloigné des feuillets.

S. A. BARBER et S. D. EVANS (1964) ont montré que le coefficient de diffusion du rubidium dans un mélange de kaolinite et de gélose diminue quand la concentration en kaolinite augmente (les différents systèmes kaolinite-gélose contiennent les mêmes quantités de sels libres). Cette diminution de D peut être attribuée à des interactions kaolinite-cation, étant donné que l'accroissement de la teneur en argile entraîne une augmentation de la capacité d'échange du milieu. Les effets de tortuosité peuvent aussi constituer une explication partielle.

Un autre exemple d'interaction cation-réseau est donné dans les expériences de T. M. LAI et M. M. MORTLAND (1960) :

Montmorillonite Na p. 100 (poids)	D $cm^2\ sec^{-1} \cdot 10^{-6}$
7,8	6,25 ± 0,12
8,9	5,70 ± 0,11
12,9	4,47 ± 0,09
15,2	3,60 ± 0,07

Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus à l'occasion de mesures de conductivité sur des gels d'argile (R. WEILER, 1966). Alors que la conductivité globale du gel augmente quand la teneur en argile augmente, la conductivité de surface diminue. Cette dernière varie de la même façon que les coefficients de diffusion trouvés. Il n'est pas possible de dire si les interactions cation-réseau sont les seules causes des effets observés. Il est probable qu'une explication plus complète doit tenir compte du rôle de l'eau.

On pourrait penser que les cations bivalents étant plus fortement retenus (W. KEMPER, 1966) leur coefficient de diffusion doit être plus faible. Il faut être prudent dans l'énoncé d'un tel fait car les expériences ne sont pas convaincantes à ce point de vue. Les ions monovalents doivent se trouver au-dessus des cavités hexagonales ou plus ou moins enfoncés dans celles-ci. Cette situation est vraisemblablement moins probable pour les cations bivalents, puisqu'ils neutralisent deux charges. D'ailleurs, le phénomène de démixion présenté par ces derniers est un argument en faveur de cette idée. Une conclusion concernant les vitesses relatives de diffusion des cations

monovalents et des cations bivalents est difficile à dégager. Le tableau suivant donne quelques résultats :

Auteurs	Cation	p. 100 d'argile (montmorillonite)	D $cm^2\ sec^{-1} \cdot 10^{-6}$
T. M. Lai et Mortland (1960)	Na^+	15,2	3,60 ± 0,07
	Cs^+	16,6	0,40
	Ca^{++}	17,9	2,36 ± 0,07
R. G. Gast (1962)	Na	3	3,39 ± 0,19
	K	3	4,46 ± 0,28
	Ca	3	0,607 ± 0,045
	Ba	3	0,358 ± 0,018
	Sr	3	0,674 ± 0,040

Le deuxième effet électrique est l'induction dans le cation d'un moment dipolaire proportionnel à sa polarisabilité. Le moment dipolaire induit peut avoir une importance dans les interactions cation-eau.

2) *Effets géométriques.*

Les cations adsorbés se déplacent entre les feuillets de la montmorillonite (sauf ceux qui se trouvent sur les surfaces externes). L'espacement interfeuillet délimite donc un certain volume dans lequel les déplacements ont lieu. Quand la teneur en eau est élevée les mouvements sont peu gênés aux effets électriques près. Par contre, quand l'écartement n'est que de quelques angströms (écartement correspondant à une ou deux couches d'eau), la taille du cation peut être un facteur limitant la diffusion. Ainsi, pour une montmorillonite contenant 16 p. 100 d'eau, le coefficient de diffusion du sodium est de l'ordre de 10^{-8} cm^2 sec^{-1} alors que celui du césium est de l'ordre de 10^{-11} cm^2 sec^{-1}. Des effets analogues en rapport avec l'espace disponible sont également connus pour la diffusion des cations alcalins dans des zéolithes (R. M. Barrer et L. V. C. Rees, 1960).

C — *Interactions cation-eau*

Le coefficient de diffusion dépend de la teneur en eau comme le montrent de nombreux résultats (W. D. Kemper, 1960 ; A. S. Patil, 1963 ; W. Klute et J. Letey, 1958 ...). Plus le système est hydraté, plus la diffusion est rapide.

Les effets précédemment étudiés sont modifiés par la présence de l'eau. Dans une argile gonflante, elle intervient de deux façons. Elle provoque l'écartement des feuillets et contribue donc à augmenter l'espace disponible pour les mouvements des cations. Les interéactions avec ces derniers, sont telles que ses propriétés sont différentes de celles de l'eau libre. La densité plus faible (D. M. Anderson, P. F. Low, 1958), la diminution d'entropie qui accompagne l'adsorption (P. F. Low,, 1963), la viscosité plus grande (P. F. Low, 1959), l'absorption dipolaire Debye (J. Chaussidon, J., Mamy 1966 ; J. Mamy, 1966 ; R. Weiler, 1966), montrent que l'eau interfeuillet possède une certaine structure qui dépend de la nature du cation et de la

quantité d'eau. Cette structure serait plus développée avec le sodium dans les gels et les suspensions (P. F. Low, 1959), avec le potassium pour les faibles états d'hydratation (J. Mamy, 1966). Il n'existe pas de description de cette structure. T. Martin (1962), imagine deux configurations possibles : l'une d'elles aurait les caractéristiques d'un solide, l'autre serait celle d'un liquide bidimensionnel. Le réseau intervient peut-être dans cette structuration de l'eau, mais on ne possède pas de renseignements à ce sujet.

Les molécules d'eau sont donc probablement arrangées selon une certaine configuration en étroite liaison avec les cations. Il en résulte trois faits :

1. En hydratant les cations les molécules d'eau doivent diminuer l'attraction due au réseau et donc, faciliter son déplacement.

2. L'éloignement du cation de la surface provoque probablement une modification de l'arrangement des molécules d'eau. En effet, on peut penser que celles-ci peuvent alors adopter une configuration plus symétrique, et par là, plus ordonnée. Il est logique de s'attendre à ce que l'entropie du système diminue lorsque les cations se déplacent. C'est le résultat qui est obtenu quand on peut définir une distance de saut. En particulier, si celle-ci est identifiée à la distance qui sépare deux cavités hexagonales situées près d'une zone à forte densité de charge négative, λ est égal à 10 Å pour la montmorillonite. Dans ce cas, H. C. Thomas et A. Cremers (1966) trouvent des valeurs négatives de ΔS pour une suspension de montmorillonite sodique. De même, pour des états d'hydratation plus faible, le calcul donne (J. Chaussidon, R. Calvet, 1966).

Argile : montmorillonite Na

Teneur en eau p. 100 du poids sec	5	7,5	10	12,5	15
Δ S. cal deg^{-1} mole^{-1}	— 3,75	— 7,25	— 7,10	— 10,13	— 11,55

3. Les cations perturbent la structure de l'eau lorsqu'ils se déplacent. Cette résistance au déplacement dépend certainement de la teneur en eau. Elle est en partie à l'origine de la barrière de potentiel.

La conclusion la plus évidente est que le coefficient de diffusion augmente quand l'hydratation du système augmente comme le montrent les chiffres donnés par M. M. Mortland (voir précédemment : l'effet de la concentration en argile ne peut pas être séparé de celui de la teneur en eau) et les résultats suivants (J. Chaussidon, R. Calvet, 1966).

Argile : Montmorillonite Na-température 20°C.

Teneur en eau p. 100 du poids sec	4,82	7,30	13,10	19,4
D cm^2 sec^{-1}	$8{,}88 \cdot 10^{-9}$	$1{,}96 \cdot 10^{-8}$	$2{,}64 \cdot 10^{-7}$	$8{,}83 \cdot 10^{-7}$

Quand la teneur en eau est élevée (> 25 p. 100 du poids sec) le coefficient de diffusion semble étroitement relié au rayon hydrodynamique du cation (P. F. Low, 1954) :

$$D_{Li} < D_{Na} < D_K$$

Les rayons hydrodynamiques se classent dans l'ordre : Li > Na > K.

L'énergie d'activation dépend de la teneur en eau d'une façon qui n'est pas actuellement bien définie. En effet, pour la montmorillonite sodique, les valeurs trouvées sont les suivantes :

Auteurs	p. 100 d'argile (poids)	E cal·mole^{-1}
T. M. Lai M. M. Mortland (1960)	8,9 12,9 15,2	6 040 5 176 3 806
J. Chaussidon R. Calvet (1966)	82,5 90 95	4 060 6 530 8 650

Deux conclusions différentes peuvent être déduites de ces résultats :

— ou bien, il existe une variation continue des propriétés du système, et une composition particulière donne les conditions les plus favorables au déplacement des cations,

— ou bien les systèmes fortement hydratés ne sont pas comparables aux systèmes faiblement hydratés.

Des faits semblables ont été observés par R. Weiler (1966), dans l'étude de la conductivité des gels de montmorillonite. La valeur de l'énergie d'activation dépend également de la nature du cation. Elle croît dans l'ordre : Cs < Ca < Na pour des suspensions d'argile (T. M. Lai et M. M. Mortland, 1960). Il faut noter que cet ordre est inversé dans l'eau et les résines (G. E. Boyd, B. A. Soldano, 1953). L'eau est-elle le seul facteur responsable ou la phase solide a-t-elle une influence prépondérante ? Les deux interviennent simultanément et leurs participations respectives ne sont pas faciles à mettre en évidence.

D — *Diffusion et composition ionique du milieu*

La composition ionique du milieu intervient dans les phénomènes de diffusion indépendamment du rôle qu'elle joue dans la définition de la distance de saut.

Si plusieurs espèces ioniques sont présentes dans le système, les flux correspondant à chacune d'elles sont couplés. On sait qu'il faut alors parler de coefficient de diffusion mutuelle. Pour un cation donné la diffusion est influencée d'une façon différente selon que les autres ions sont des cations ou des anions.

Quand plusieurs cations sont présents, les déplacements seront, certes, limités par les interactions décrites précédemmment, mais aussi par l'échange qui intervient nécessairement. Ce point de vue peut ne pas être évident dans le cas d'argiles biioniques,

car il faudrait être certain que les cations se répartissent uniformément sur un feuillet et qu'il n'existe pas plutôt une juxtaposition de feuillets, chacun d'eux étant entièrement saturé par un cation de type donné. Par contre, l'échange se produit certainement quand un cation diffuse dans une argile saturée par un autre cation. R. F. Husted et P. F. Low (1954) ont montré que la diffusion du potassium dans des gels de montmorillonite (10 p. 100 d'argile) saturée par H^+, NH_4^+, Na^+ et Li^+, est d'autant plus rapide que la diffusion des derniers cations est grande. (Ces observations sont conformes aux conclusions données dans le paragraphe IV 1re partie). L'ordre observé est $H^+ > NH_4^+ = Na^+ > Li^+$. T. M. Lai et M. M. Mortland (1961) ont obtenu des résultats semblables :

Cation saturant l'argile	Teneur en eau (%)	Cation diffusant	D $cm^2 \cdot sec^{-1} \cdot 10^{-6}$	E $cal \cdot mole^{-1}$
Li^+	87,3	Na^+	4,05 ± 0,08	5 862 ± 176
		Cs^+	0,570 ± 0,011	7 632 ± 229
Na^+	87,1	Na^+	4,47 ± 0,09	5 176 ± 155
		Cs^+	0,701 ± 0,014	7 290 ± 219
K^+	87,1	Na^+	5,29 ± 0,11	4 900 ± 147
		Cs^+	0,903 ± 0,018	6 301 ± 189

Il faut remarquer que le lithium est le cation qui apparemment diffuse le plus lentement. A ce sujet, il y a lieu de distinguer l'échange et le déplacement. En effet, la faible mobilité de ce cation peut être due, soit à un échange difficile, ce qui impliquerait une forte attraction par le réseau, soit à un déplacement lui-même difficile. Dans ce cas, étant donné la petite taille du lithium, il faudrait admettre qu'il diffuse dans un état hydraté (voir influence du rayon hydrodynamique précédemment citée).

Quand le système contient des anions (il y a des sels libres) les mouvements des cations non adsorbés sont limités. En conséquence les anions limitent aussi la diffusion globale puisque cations adsorbés et cations libres s'échangent.

E — *Conclusion*

Le déplacement des cations adsorbés nécessite de l'énergie pour :

échapper à l'attraction électrostatique due au réseau,
vaincre les forces de frottement contre les feuillets,
modifier la structure de l'eau.

Peu d'éléments permettent de savoir quel est le facteur prépondérant. L'influence des charges négatives du réseau sur la diffusion doit être plus importante quand il n'y a pas de sels libres et quand la teneur en eau est faible. Quand des ions libres sont présents dans le milieu, les mouvements des cations adsorbés restent toujours sous la dépendance des facteurs étudiés précédemment. Dans ce cas, cette dépendance a des conséquences moins marquées sur les faits observables, car ce sont les ions libres qui sont responsables de la plus grande partie du transport par diffusion.

III. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU PHÉNOMÈNE DE DIFFUSION

Les mouvements des cations peuvent être étudiés, soit par des expériences de diffusion, soit par des mesures de conductivité électrique.

A — *Détermination des coefficients de diffusion*

Les principaux éléments théoriques ont été donnés dans la première partie de cet exposé. On sait qu'une estimation du coefficient d'autodiffusion est donnée par la détermination du coefficient de diffusion d'un isotope radioactif. Les dispositifs expérimentaux utilisés sont souvent ceux qui ont été décrits :

— source mince $C(x,t) = \frac{M}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$

— source épaisse $C(x, t) = \frac{Co}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$

Il faut signaler deux méthodes dont l'application peut être utile. La méthode de R. K. SCHOFFIELD et I. J. GRAHAM-BRYCE (1960) consiste à séparer le milieu de diffusion de la source épaisse par une membrane échangeuse équilibrée avec une concentration égale à $\frac{Co}{2}$. La méthode de H. C. THOMAS (1956) : le gel d'argile marquée est séparé d'une solution coulante par une membrane semi-perméable. Le schéma est celui d'une diffusion dans un milieu infini avec un puits (la solution coulante). L'expérience consiste à mesurer la diminution d'activité dans le gel. L'emploi de ces deux techniques est limité aux systèmes fortement hydratés (gels, suspensions).

La détermination du coefficient de diffusion peut se faire de deux façons :

— à partir de la courbe $C(x, t) = f(x)$. Il faut ajuster une courbe théorique à une courbe expérimentale.

— à partir de la quantité totale Q_t qui a diffusé pendant le temps t. Par exemple, dans le cas d'une source épaisse, on a (voir W. JOST, 1960) :

$$D = \frac{(Q_t)^2 \pi}{S^2 Co^2 t}$$

D : coefficient de diffusion ;
Q_t : quantité totale qui a diffusé pendant le temps t ;
S : section perpendiculaire à la direction du flux ;
Co : concentration initiale dans la source ;
t : durée de l'expérience.

Certains auteurs ont essayé d'exprimer le coefficient de diffusion ainsi déterminé en fonction du coefficient de diffusion dans l'eau (L. K. PORTER et *al.*, 1960 ; A. H. BLOKSMA, 1957 ; G. E. FLETCHER, 1960 ; R. G. GAST, 1963). On fait ainsi appa-

raître les facteurs limitant la diffusion du fait de la présence d'une phase solide qui intervient en modifiant la géométrie du ou des chemins de diffusion et en provoquant diverses interactions. On écrit :

$$D_a = D_o \gamma h \text{ avec } \gamma \leqslant 1 \text{ et } h \leqslant 1$$

D_a : coefficient de diffusion apparent (il est donné par l'expérience).
D_o : coefficient de diffusion dans l'eau ;
γ : facteur tenant compte des interactions avec la phase solide.
h : facteur de tortuosité.

La notion de facteur de tortuosité repose sur la distinction entre chemin de diffusion réel L_r et chemin mesuré L_m (voir fig. 2).

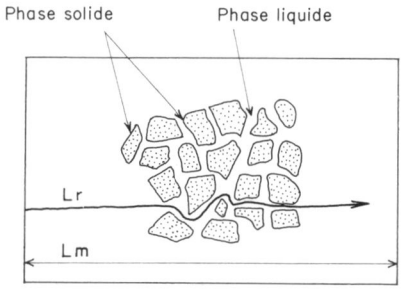


FIG. 2. — *Différence entre le chemin réel L_r et le chemin mesuré L_m*

$$\text{Si } L_r = L_m \qquad h = 1$$
$$L_r > L_m \qquad h < 1$$

L'estimation du facteur h est faite par la mesure du coefficient de diffusion des anions. Pour ces ions, on suppose que la tortuosité intervient seule pour modifier la valeur de D. Il faut admettre que le mouvement des anions n'est pas influencé par la phase solide, ce qui est difficilement acceptable en raison de l'adsorption négative et de la présence possible de charges positives fixes (Al^{3+} par exemple).

h étant connu, on peut calculer γ, dont les valeurs peuvent être considérées comme des mesures des effets divers qui modifient le déplacement des ions, sans pour autant donner des explications supplémentaires.

Il faut remarquer que la comparaison avec la diffusion dans l'eau a une signification pour des ions libres dans des gels ou des suspensions. Pour des ions adsorbés et *a fortiori* dans des systèmes peu hydratés, cette comparaison perd de son intérêt.

Quand il y a des sels libres, le flux total est la somme de deux flux : l'un dû aux cations adsorbés, l'autre dû aux cations libres. P. H. NYE (1966) et A. H. BLOKSMA (1957) ont essayé de développer une formulation qui tient compte de ces deux contributions. L'hypothèse de base est que le rapport entre le temps pendant lequel un cation est adsorbé et le temps pendant lequel il est libre est égal au rapport des concentrations en ions adsorbés et libres. W. D. KEMPER (1966) a calculé la fraction d'ions Na^+ et Ca^{++} adsorbés qui participent à la diffusion. Ses résultats montrent que le calcium doit être plus fortement retenu.

B — *Mesures de conductivité*

On sait que la relation de Nernst-Einstein permet d'exprimer le coefficient de diffusion en fonction de la mobilité déterminée par une mesure de conductivité :

$$D = u \cdot k \cdot T \qquad (4)$$

D = coefficient de diffusion.
u = mobilité (vitesse acquise sous l'action d'une force unité)
k = constante de Boltzmann ;
T = température en degré Kelvin.

L'utilisation de cette formule soulève des difficultés qui concernent la détermination de u et la formule elle-même. La mobilité u doit être déterminée en toute rigueur à partir de mesures effectuées en courant continu. Or, de telles mesures sont pratiquement irréalisables en raison des phénomènes d'électrolyse et de polarisation des électrodes. Par contre, les mesures en courant alternatif sont beaucoup plus faciles. On peut alors se proposer d'exprimer la conductivité en fonction de la fréquence, et faire une extrapolation pour une fréquence nulle. En ce qui concerne les systèmes argile-eau, cette extrapolation semble difficile et certains auteurs utilisent des valeurs déterminées aux basses fréquences ($\simeq$ 1 000 Hz). Une deuxième difficulté est due au fait que l'on effectue une mesure de conductance pour obtenir la conductivité.

Cette mesure tient compte de tous les porteurs de charge du milieu. Dans des systèmes hydratés la conduction n'est pas entièrement due aux cations ; des protons interviennent et dans certaines conditions (faible teneur en eau et température inférieure à zéro degré centigrade) leur participation à la conductivité peut devenir dominante (J. Mamy, 1967).

Enfin, la relation (4) n'est pas tout à fait rigoureuse. Elle doit tenir compte du type de mécanisme selon lequel les particules se déplacent (P. G. Shewmon, 1963).

IV. — CONCLUSION

L'analyse des différents facteurs qui conditionnent la diffusion des cations peut donner des renseignements relatifs aux propriétés du milieu et de l'espèce ionique diffusante. Néanmoins, il faut insister sur le fait que l'expérience ne permet pas d'atteindre la diffusion des cations au niveau des feuillets. L'effet observé est un effet moyen, mais on peut espérer qu'il est représentatif des propriétés microscopiques de l'argile. Le fait important est que l'expérience permette de classer les différents systèmes en fonction de la nature du cation et de la teneur en eau de l'argile. Les mesures effectuées donnent des valeurs relatives.

Les valeurs de λ et ΔS déterminées par la théorie de Eyring sont des limites étant donné que l'un des paramètres est calculé en laissant l'autre constant. Les vraies valeurs doivent se trouver comprises entre ces limites, et compte tenu de l'ordre de grandeur très acceptable de ces dernières, on peut considérer que la théorie

de Eyring fournit pour la diffusion dans les systèmes argile-eau, une formulation appropriée.

A côté de l'aspect fondamental, les phénomènes de diffusion ont une importance pratique car ils donnent lieu à un transport de matière. Dans l'industrie ces phénomènes interviennent par exemple dans les processus de purification, de catalyse. En agronomie, ils peuvent jouer un rôle dans l'alimentation des végétaux. Dans le sol, l'approvisionnement des racines en éléments minéraux est dû :

— au transport par le courant de la solution du sol ;

— à l'interception d'un certain volume de sol par les racines au cours de leur croissance ;

— au transport par diffusion.

Ce dernier peut être important dans certaines conditions (faible teneur en eau, faible concentration de la solution du sol). Cependant, la variété des composés minéraux et organiques, la superposition des phénomènes physico-chimiques et biologiques font du sol un milieu très complexe. Il en résulte que les facteurs limitants du phénomène de diffusion peuvent différer profondément de ceux qui interviennent dans les systèmes argile-eau qui ont été les seuls envisagés dans cette revue bibliographique.

Reçu pour publication en mars 1967.

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. HENIN, Chef du Département Agronomie I. N. R. A. et M. J. CHAUSSIDON, Maître de Recherches, Agronomie C. N. R. A., pour les nombreux conseils qu'ils nous ont donnés au cours de la rédaction de ce travail.

SUMMARY

DIFFUSION IN CLAY-WATER SYSTEMS
SECTION II : CATION DIFFUSION

The Eyring's theory of rate process provides a mean to investigate cationic diffusion in clay-water systems. When taking into account the concept of preferential sites on a geometrical basis, it is possible to estimate hopping distances. These latter values may be also deduced from the diffusion coefficient with the assumption of the constancy of the entropy change, ΔS.

Diffusion coefficient and activation energy depend on the interactions lattice-cations, water-cations and cations-other ions.

ZUSSAMMENFASSUNG

DIE DIFFUSION IN DEN TON-WASSER-SYSTEMEN.
II. KATIONEN-DIFFUSION

Die Kationen-Diffusion in den Ton-Wasser-Systemen kann mit Hilfe der Theorie von Eyring untersucht werden. Die Verwendung des Begriffes bevorzugter Lagerstätten erlaubt Sprungintervalle zu bestimmen. Werte dieses Parameters können auch, unter der Voraussetzung einer konstanten Entropieänderung ΔS, berechnet werden.

Der Diffusionskoeffizient und die Aktivierungs-energie sind von den Interaktionen Kationen-Netz, Kationen-Wasser und Kationen-andere Ionen abhängig.

РЕЗЮМЕ

Диффузия в системе глина - влага.

Вторая часть : Диффузия катионов.

Р. КАЛЬВЭ.

Диффузию в системе глина - влага можно изучать пользуясь теорией Эйринга. Применяя понятие «привиллегированных» пунктов возможно определить длинну «скачка» ионов. Значение этого параметра может быть вычислено также, если воспользоваться гипотезой о том, что вариация энтропии S, является постоянной.

Коеффициент диффузии и энергия активации зависят от взаимоотношений между катионами сетью, влагой и другими ионами.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON D. M., LOW P. F., 1958. The density of water adsorbed by lithium, sodium and potassium Bentonite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 99-103.

BARRER R. M., REES L. V. C., 1960. Self-diffusion of alkali metal ions in Analcite. *Trans. Farad. Soc.*, **56**, 709-721.

BLOKSMA A. H., 1957. The diffusion of sodium and iodide ions and of urea in clay pastes. *J. Colloid. Sci.*, **12**, 40-52.

BOLT G. H., 1963. Short Contributions. *Internation. Clay Conf.*, Pergamon Press, **21**, 340.

BOYD G. E., SOLDANO B. A., 1953. Self-diffusion of cations in and through sulfonates polystyrene cation exchange polymers. *J. amer. chem. Soc.*, **75**, 6091-6099.

CHAUSSIDON J., CALVET R., 1966 *a*. Diffusion du sodium dans la montmorillonite aux faibles états d'hydratation. *Bull. Gr. fr. Argiles* (sous presse).

CHAUSSIDON J., MAMY J., 1966 *b*. Étude de l'absorption dipolaire de l'eau adsorbée sur la montmorillonite. *Bull. Gr. fr. Argiles* (sous presse).

DE BOER J. H., 1953. *The dynamical character of adsorption.* Oxford, the Clarendon Press.

EVANS S. D., BARBER S. A., 1964. The effect of cation exchange capacity, clay content, and fixation of rubidium 86. Diffusion in soil and kaolinite systems. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 53-55.

FLETCHER G. E., SLABAUGH W. H., 1960. Self-diffusion of calcium ions in calcium montmorillonite gels. *J. Collo'd Sci.*, **15**, 485-488.

GAST R. G., 1962. An interpretation of self-diffusion measurements of cations in clay-water systems. *J. Colloid Sci.*, **17**, 492-500.

GAST R. G., 1963. Relative effects of tortuosity, electrostatic attraction and increased viscosity of water on self-diffusion rates of cations in bentonite water systems. *Internation. Clay Conf.*, Pergamon Press, **21**, 251-259.

JOST W., 1960. *Diffusion in solids, liquids ans gases.* Academic Press, New York.

KEMPER W. D., VAN SCHAIK J. C., OLSEN S. R., 1966. Contribution of adsorbed cations to diffusion in clay-water systems. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 17-22.

KLUTE A., LETEY J., 1958. The dependance of ionic diffusion on the moisture content of non-adsorbing porous media. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 213-215.

LAI T. M., MORTLAND M. M., 1960. Self-diffusion of exchangeable cations in bentonite. *Internation. Clay Conf., Clays and Clay Minerals*, Pergamon Press, **9**, 229-247.

LAI T. M., MORTLAND M. M., 1961. Diffusion of ions in bentonite and vermiculite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 353-357.

LOW P. F., HUSTED R. F., 1954. Ion diffusion in bentonite. *Soil Sci.*, **77** 5., 343-353.

LOW P. F., 1959. Viscosity of water in clay systems. *Clays and Clay Minerals*, **8**, 170-182.

LOW P. F., DUTT G. R., 1962. Diffusion of alkali chlorides in clay-water systems. *Soil Sci.*, **93-94**, 233-240.

LOW P. F., OSTER J. D., 1963. Activation energy for ion movement in thin water films on montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 369-373.

MAMY J., 1967. Thèse, Université de Paris (sous presse).

MARTIN R. T., 1962. Adsorbed water on clay : a review. *Clays and Clay Minerals*, **19**, 28-70.

NYE P. H., 1966. The measurement and mechanism of ion diffusion in soil. The relation between self-diffusion and bulk diffusion. *J. Soil Sci.*, **17**, 1, 16-23.

PATIL A. S., KING K. M., MILLER M. H., 1963. Self-diffusion of rubidium as influenced by soil moisture tension. *Canad. J. Soil Sci.*, **43**, 44-51.

PORTER L. K., KEMPER W. D., JACKSON R. D., STEWART B. A., 1960. Chloride diffusion in soils as influenced by Moisture Content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 460-463.

SCHOFIELD R. K., GRAHAM-BRYCE I. J. , 1960. Diffusion of ions in soils. *Nature*, **188**, 1048-1049.

SHAINBERG I., KEMPER W. D., 1967. Conductance of adsorbed alkali cations in aqueous and alcoholic bentonite pastes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 700-706.

SHEWMON P. G., 1963. *Diffusion in solids*. Mas Graw-Hill Series.

THOMAS H. C., 1956. A new method for the measurement of self-diffusion. *Proc. nation. Acad. Sci. US.*, **42**, 909-913.

THOMAS H. C., CREMERS A., 1966. Self-diffusion in suspension. *J. Phys. Chem.*, 3229-3234.

WEILER R. A., 1966. *Conductivité de surface et propriétés diélectriques des gels de montmorillonite*. Thèse Université de Louvain.

Ann. agron., 1967, **18** (4), 445-447.

CHRONIQUE DES LIVRES

TRAITÉ DE BIOCHIMIE GÉNÉRALE (sous la direction de M. JAVILIER, M. POLONOVSKI, M. FLORKIN, P. BOULANGER, M. LEMOIGNE, J. ROCHE et R. WURMSER) tome 3 : LES PROCESSUS BIOCHIMIQUES DE SYNTHÈSE ET DE DÉGRADATION, fascicule 1. — ÉNERGÉTIQUE BIOCHIMIQUE ET CYCLES DES ÉLÉMENTS. — Paris, Masson, 1967, 672 p.

Le tome 3 du Traité de Biochimie Générale est consacré à la biochimie métabolique. Il se présentera en trois fascicules : métabolisme énergétique et cycles des éléments ; métabolisme des glucides, des lipides et des composés apparentés ; métabolisme des composés azotés.

Le premier fascicule est donc réservé au métabolisme général des éléments.

L'énergétique biochimique qui fait l'objet de la première partie de l'ouvrage, comporte l'étude thermodynamique des réactions et de leurs couplages, les processus par lesquels les organismes autotrophes et hétérotrophes utilisent l'énergie nécessaire à la vie cellulaire, et les mécanismes des oxydations phosphorylantes de la respiration cellulaire. Une large place a été réservée à la photosynthèse.

Le cycle du carbone constitue un ensemble important : entrée du carbone dans le monde vivant par assimilation du CO_2, sorties du CO_2 par les processus de décarboxylation, métabolisme des composés monocarbonés (formyle, hydroxyméthyle et méthyle), métabolisme des composés bicarbonés et dégradation de l'acétyle par le cycle tricarboxylique.

Plusieurs chapitres sont consacrés au cycle de l'azote, à la fixation de l'azote de l'air, aux transaminations et à l'uréogenèse. Le cycle du soufre comporte la réduction des sulfates et l'entrée du soufre dans les composés organiques à partir des différentes formes de soufre minéral, les réactions de transsulfuration et les voies du catabolisme oxydatif des composés soufrés.

Les cycles du phosphore qui font partie des métabolismes de tous les composés organiques, sont illustrés de nombreux schémas.

Enfin les cycles métaboliques et physiologiques des métaux (Ca, Fe, Cu, Zn, Co, Mo, Mn, etc.) et métalloïdes (I, Br, Se, etc.) complètent ce volume de biochimie métabolique générale.

MCVICKAR (M. H.), MARTIN (W. P.), MILES (I. E.), TUCKER (H. H.), ed. — AGRICULTURAL ANHYDROUS AMMONIA. TECHNOLOGY AND USE. (L'AMMONIAC ANHYDRE AGRICOLE. TECHNOLOGIE ET UTILISATION). — Memphis (Tenn.), Agricultural Ammonia Institute ; Madison (Wis.), American Society of Agronomy ; Madison (Wis.), Soil Science Society of America, 1966, 314 p.

Cet ouvrage publie les compte rendus d'un Symposium organisé les 29 et 30 septembre 1965 à Saint-Louis (Mo.) par les 3 organismes ci-dessus. Il comprend les articles suivants :

SNYDER (J. L.), BURNETT (J. A.) . Procédés de fabrication de l'ammoniac.
SHARP (J. C.). Propriétés de l'ammoniac.
SLACK (A. V.), HARDESTY (J. O.). Les engrais fabriqués à partir de l'ammoniac.
DOUGLAS (J. R.), COGSWELL (S. A.). Production et utilisations passées, présentes et futures de l'ammoniac anhydre.
SMITH (F. W.). Application de l'ammoniac (aux différentes cultures).
WARNOCK (R. E.). Application de l'ammoniac dans l'eau d'irrigation.
LEAVITT (F. H.). Développement de l'équipement pour l'emploi de l'ammoniac en agriculture.
GILLENTINE (F.), HUEY (J. T.). Manutention de l'ammoniac.
BROADBENT (F. E.), STEVENSON (F. J.). Interactions avec les matières organiques.
MORTLAND (M. M.). Interactions de l'ammoniac avec les minéraux du sol.
FREDERICK (L. R.), BROADBENT (F. E.). Interactions biologiques.
PARR (J. F.), PAPENDICK (R. I.). Rétention de l'ammoniac dans les sols.
STANFORD (G.). Besoins azotés des cultures en vue d'un rendement maximum.
THOMPSON (J. F.). Le rôle de l'ammoniac dans le métabolisme azoté des plantes.
SCOTT (W. C.), TISDALE (S. L.). Les solutions ammoniac-soufre pour l'agriculture.
TUCKER (B. B.), CROWE (G. B.). Intérêt de l'emploi de l'ammoniac anhydre comme engrais azoté.
HAWKES (G. R.), ELLIOTT (F. C.). Les utilisations agricoles de l'ammoniac autres que les engrais.

LEMÉE (G.). — PRÉCIS DE BIOGÉOGRAPHIE. — Paris, Masson, 1967, 358 p.

La publication de ce Précis après ceux de Géomorphologie, de Climatologie, de Pédologie et d'Hydrobiologie dans la même collection, répond à un ordre logique : la Biogéographie est en effet une science de synthèse, qui doit faire appel à ces différentes disciplines afin d'en utiliser les acquisitions d'intérêt biologique pour l'établissement des rapports du peuplement vivant du globe avec les autres grands phénomènes géographiques, climats, formes du relief, sols caractères du milieu aquatique.

Écrivant dans un souci didactique, l'auteur s'est efforcé de faire preuve de la plus grande objectivité dans un domaine où s'affrontent conceptions et systèmes. Suivant la méthode adoptée par plusieurs traités étrangers, la géographie des végétaux et celle des animaux ont été aussi étroitement associées que possible, en raison des similitudes dans le déterminisme de leur répartition géographique et stationnelle, et de leurs nombreux liens d'interdépendance.

Enfin, l'Écologie, étude des relations entre les organismes et le milieu naturel, qui est actuellement en pleine expansion par suite de son importance pour le développement des ressources alimentaires, l'aménagement rationnel des habitats humains, la protection de la Nature, tient dans ce livre une place importante.

Les grandes divisions en sont les suivantes :

I. — La répartition géographique des organismes et ses causes : la Chorologie. (Moyens d'expansion des organismes. Aires de distribution géographique. Territoires faunistiques et floraux.)

II. — Les facteurs du milieu et leur rôle dans la distribution et la vie des organismes : l'Écologie. (Caractères généraux des relations entre facteurs écologiques et organismes. Facteurs énergétiques. Facteurs hydriques. Facteurs chimiques. Actions mécaniques. Facteurs biotiques ; notion d'écosystème.)

III. — Les communautés d'organismes : la Biocœnotique. (Délimination et organisation des communautés. Critères et classification. Écologie et évolution. Cartographie de la végétation).

IV. — Les grandes formations biologiques du globe. (Milieux et communautés aquatiques : caractères généraux, mers et océans, eaux continentales. Milieux et communautés terrestres : toundras, zones arides, steppes, savanes, formations arbustives, forêts.)

GAUTIER (J. A.), MALANGEAU (P.), éd. — MISES AU POINT DE CHIMIE ANALYTIQUE ORGANIQUE, PHARMACEUTIQUE ET BROMATOLOGIQUE. — 15e série. Paris, Masson, 1967, 350 p.

Le présent ouvrage, quinzième de la série, comprend six articles :

Le phénomène de fluorescence et ses applications analytiques, par R. BIURDON.

Problèmes de la recherche des substances étrangères des grains, farines et produits de transformation, par J. BURE et coll.

L'emploi des réactions enzymatiques dans l'établissement de la structure des polysaccharides, par D. DEDONDER.

L'analyse instrumentale : développement récents, perspectives d'avenir, par J. LEFEBVRE.

Progrès récents dans la chromatographie des substances naturelles macromoléculaires, par L. MUNIER.

L'analyse organique fonctionnelle au service de la chimie organique de synthèse, par F. PELLERIN.

NOGUCHI (Y.), SUGAWARA (T.). — POTASSIUM AND JAPONICA RICE. SUMMARY OF TWENTYFIVE YEARS' RESEARCH. — Berne, International Potash Institute, 1966, 102 p.

Cet ouvrage préparé par deux chercheurs japonais réputés, les professeurs Y. NOGUCHI, Université de Tokyo, et T. SUGAWARA, Université d'Utsunomiya, rend compte de recherches poussées sur les effets des éléments nutritifs et plus particulièrement du potassium sur la croissance, l'épiaison et la maturation du riz sous l'angle physiologique, écologique et anatomique.

Bien que ce rapport tienne surtout compte des conditions existant au Japon, les résultats des essais décrits sont aussi d'un grand intérêt pour d'autres régions où l'on cultive le riz.

Il intéressera très certainement tous ceux, agronomes et chercheurs, qui se préoccupent de l'amélioration de la production du riz.

KNEESE (A. V.). — ÉCONOMIE ET GESTION DE LA QUALITÉ DES EAUX. (TRADUIT ET ADAPTÉ DE L'AMÉRICAIN PAR H. LEVY-LAMBERT). — Paris, Dunod, 1967, 296 p.

La satisfaction des besoins en eau est un des problèmes les plus importants qui se posent aux pays développés dans la seconde moitié du XXe siècle. Les villes, les industries et l'agriculture exigent

de plus en plus d'eau pure mais rejettent simultanément de plus en plus de déchets qui rendent les rivières inutilisables et inhabitables pour les poissons et compromettent gravement la valeur esthétique et touristique des cours d'eau et des plages.

Ces difficultés croissantes ont-elles un caractère inéluctable ? Sont-elles dues à une insuffisance physique des ressources naturelles face à des besoins incompressibles et à des techniques d'utilisation invariables ? — Faudrait-il recourir à des techniques coûteuses comme le dessalement de l'eau de mer ? — Ou bien une organisation adaptée pourrait-elle permettre de concilier les intérêts en présence et sur quelles bases ? — Qui doit payer les frais de la lutte contre la pollution des eaux ? —

Telles sont les questions exposées dans ce livre. Après un survol rapide des aspects techniques de la pollution des eaux, les mécanismes classiques d'allocation des ressources sont examinés et les causes de leur inadaptation au problème posé, mises en évidence. Les règles optimales d'action des organisations chargées de la gestion de la qualité des eaux au niveau de chaque bassin sont comparées ensuite aux règles adoptées par les organisations des bassins de l'Ohio et de la Ruhr et aux règles susceptibles d'être adoptées par les agences de bassin qui se mettent en place actuellement en France.

Cet ouvrage intéresse les hydrologues et techniciens sanitaires, qui doivent réaliser les investissements nécessaires, les élus locaux et nationaux, qui se préoccupent à juste titre de ce problème vital pour le pays, les utilisateurs d'eaux agricoles, domestiques et industrielles qui sont victimes de la pollution des eaux mais en sont en même temps responsables, et les fonctionnaires de l'État qui ont la charge de la police des eaux ou de la tutelle des différents secteurs d'utilisation.

CASTANY (G.). — TRAITÉ PRATIQUE DES EAUX SOUTERRAINES. — Paris, Dunod, 2e éd., 1967, 696 p.

La prospection et l'étude des eaux souterraines, l'évaluation des réserves et des ressources aquifères ainsi que leur exploitation rationnelle et leur conservation sont d'une importance capitale pour le développement agricole, économique ou industriel d'une région. Ces études et recherches reposent sur des connaissances théoriques et pratiques que rassemble et coordonne cet ouvrage.

De nombreux cas concrets y sont décrits.

Les données théoriques, indispensables pour bien comprendre les phénomènes de l'eau dans le sol et le sous-sol sont exposées et développées pour permettre de dégager les limites d'application et leur validité dans les conditions naturelles de gisement des eaux souterraines. Les notions essentielles d'hydrobiologie de surface, indispensables à l'hydrogéologue, font l'objet d'un développement orienté vers l'évaluation des facteurs du bilan hydrologique. L'eau dans le sol et le sous-sol est étudiée du double point de vue statique et dynamique, l'écoulement des eaux souterraines, soit dans les nappes, soit vers les ouvrages de captage étant particulièrement examiné. L'étude expérimentale des terrains aquifères par les essais de débits, où les méthodes modernes d'application des formules de non-équilibre sont développées, est rédigée de façon pratique ; de nombreuses solutions graphiques sont données. L'étude de la surface piézométrique des nappes est orientée vers l'établissement et l'interprétation des cartes en courbes isopièzes et l'analyse des variations de niveaux, bases essentielles de l'hydrogéologie régionale. L'évaluation des réserves en eaux est envisagée par différentes méthodes, dont celles des courbes de tarissement, et des variations de niveaux piézométriques retiennent particulièrement l'attention. Les deux derniers chapitres exposent les connaissances actuelles sur l'hydrogéologie karstique et les eaux thermominérales. Cet ouvrage abondamment illustré, destiné aux hydrogéologues et hydrologues, intéressera les ingénieurs du Génie rural, des Travaux publics, des Ponts et Chaussées et tous les techniciens des problèmes de l'eau ou de la mise en valeur de tous les pays.

BOUSSARD (J.-M.), PETIT (M.). — PROBLÈMES DE L'ACCESSION A L'IRRIGATION. ÉTUDE ÉCONOMÉTRIQUE D'UNE PETITE RÉGION. — Paris, I. N. R. A. (Département d'économie et de sociologie), et Le Tholonet (Bouches-du-Rhône), Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la région provençale, 1966, 215 p.

L'objet de cette étude est de déterminer, dans une zone en cours d'équipement hydraulique, les conditions qui favorisent le développement de la consommation de l'eau et, par là même, le plein emploi des investissements consentis.

Elle fait ressortir que les retards enregistrés dans l'extension des techniques modernes de culture rendues possibles par l'irrigation, sont essentiellement dus à l'incertitude ressentie par les agriculteurs dans le domaine de l'écoulement de leur production. Elle met donc en évidence la nécessité de doubler tout équipement technique d'un équipement de commercialisation.

Elle comporte enfin une description détaillée de la méthode employée et de l'outil mathématique utilisé.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : DUPONT et DUVAL (1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatres langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — *3-1967.*

Dépôt légal : 3e trimestre 1967. N° d'impression : 863.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 18 1967 NUMÉRO 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

Ann. agron., 1967, **18** (5), 455-484.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES SOLS GRANITIQUES ET SCHISTEUX DE BRETAGNE

LE BASSIN VERSANT DU BLAVET

M. COPPENET et A. RAMPON

Station d'Agronomie, 29 - Quimper
Institut national de la Recherche agronomique
Centre de Recherches et d'Expérimentation du Génie rural (1), *92 – Antony*

SOMMAIRE

La description de 220 profils et l'analyse granulométrique et chimique de 450 échantillons provenant de 129 de ces profils a permis de bien caractériser les deux grandes catégories de sols rencontrées dans l'extrémité occidentale du Massif armoricain : sols granitiques et sols schisteux. Les conclusions des prospections et de l'examen des résultats analytiques portent essentiellement sur la texture, le lessivage de l'argile, les cations échangeables, le taux de saturation, la nature des humus naturels et la classification pédogénétique.

INTRODUCTION

L'étude du devenir de l'eau dans le bassin versant du Blavet, par l'un d'entre nous (A. RAMPON (2)), a conduit à entreprendre une prospection pédologique sur le bassin considéré. Le Blavet prend sa source sur le versant sud de la ligne des Monts d'Arrée à une vingtaine de kilomètres au sud-ouest de Guingamp (Côtes-du-Nord), il arrose Pontivy (Morbihan) et se jette dans l'Atlantique à Lorient.

La carte 1 indique les limites du bassin versant ainsi que les principales zones géologiques traversées :

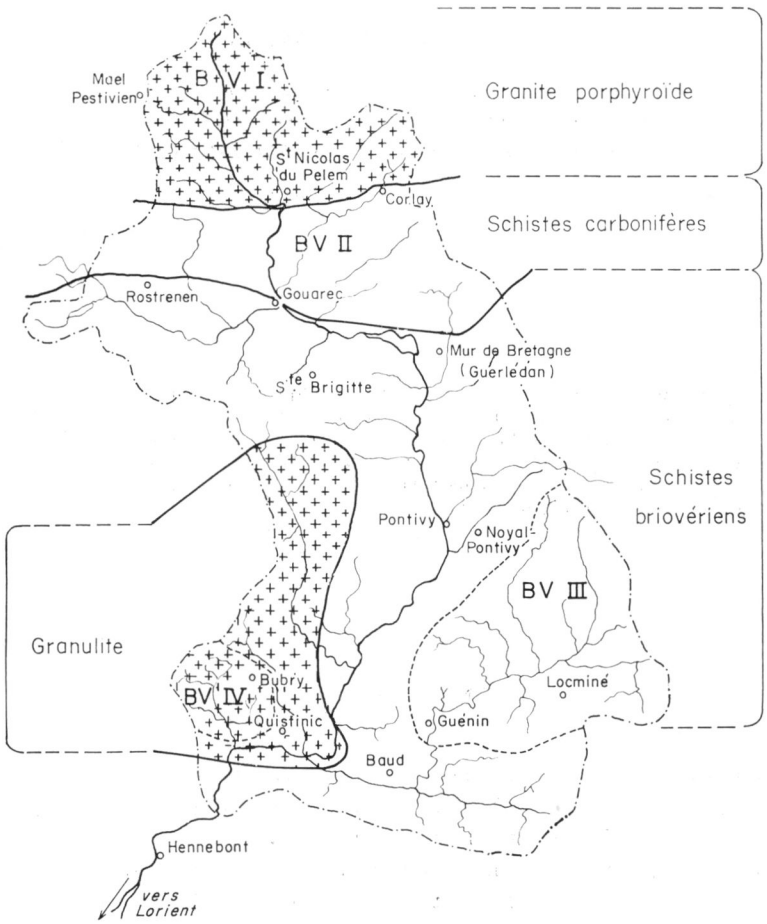
(1) Soit C. R. E. G. R., devenu récemment C. E. R. A. F. E. R. (Centre national d'Études techniques et de Recherches technologiques pour l'Agriculture, les Forêts et l'Équipement rural).
(2) Travail faisant l'objet d'une thèse de Doctorat ès Sciences.

I — *Granite porphyroïde* de la région de Saint-Nicolas-du-Pélem et de Maël-Pestivien (C.-du-N.). Ce granite présente de gros cristaux d'orthose maclés.

II — *Schistes carbonifères* (dits de Châteaulin) de la région de Corlay (C.-du-N.). Schistes fins, séricitiques, parfois ardoisiers, gris ou bleu-verdâtre, alternant avec des bancs de grès, arkoses ou psammites.

III. — *Schistes briovériens* de la région de Noyal-Pontivy et Locminé (Morbihan). Ils sont surtout représentés par l'étage des phyllades de Saint-Lô, gris-bleu ou gris-vert, alternant assez souvent avec des grès micacés et feldspathiques.

IV — *Granulite* de la région de Bubry et Quistinic (Morbihan). C'est un granite à deux micas renfermant de nombreux filons pegmatitiques ou aplitiques.



CARTE 1. — *Bassin versant du Blavet*

Au point de vue climatique, la pluviométrie annuelle est comprise entre 1 000 et 1 200 mm dans la région des sources du Blavet mais s'abaisse vers 800 mm près de son embouchure. La température moyenne annuelle se situe entre 11 et 12°. Ces

conditions sont, *a priori*, favorables à une accumulation des débris végétaux, à un lessivage des bases et des colloïdes ainsi qu'à la formation de pseudo-gleys.

La description et l'analyse des sols de ces régions vient confirmer et compléter notre connaissance des sols les plus occidentaux du Massif Armoricain telle qu'elle a déjà été exposée, en particulier, dans ces Annales, (M. COPPENET et Mme HELIAS 1958 ; F. GUITIAN-OJEA et M. COPPENET, 1963). Il importait de bien mettre en parallèle les deux grandes catégories de sols du Massif Armoricain et de disposer d'un nombre de résultats suffisamment important sur les cations échangeables, le taux de saturation, le rapport carbone sur azote.

MÉTHODES UTILISÉES

Pour chacune des quatre zones géologiques citées plus haut, un bassin versant élémentaire a été choisi. A l'intérieur de ces bassins versants élémentaires, des bassins versants partiels ont été délimités, les points de prélèvements y furent fixés à partir des photographies aériennes et en fonction de la topographie. Près des sources du Blavet, l'altitude des profils, situés en position de sommet, varie de 260 à 300 m, celle des profils situés en fond de vallée varie de 220 à 250 m, tandis que pour le bassin versant IV, le plus voisin de l'embouchure, l'altitude des sols de sommet n'est plus que de 120 à 140 m, celle des sols de bas-fond 65 à 100 m. Voici la densité des points d'observation :

	Superficie (km²)	Profils décrits	Profils analysés
B. V. I — bassin versant élémentaire I.	104	58	34
B. V. II — bassin versant élémentaire II.	231	63	39
B. V. III — bassin versant élémentaire III.	316	56	37
B. V. IV — bassin versant élémentaire IV.	48	43	19

Les prélèvements furent exécutés, la plupart du temps, à la tarière hélicoïdale (type Hélix). Dans le cadre de ce travail, il n'était pas possible de creuser une fosse à chaque emplacement choisi, ces emplacements pouvant, de plus, se trouver dans une parcelle ensemencée, une récolte sur pied ou un fond de vallée hydromorphe. Certaines tranchées, récemment ouvertes pour l'aménagement des routes, ont permis cependant des observations complémentaires.

Après dessiccation à l'air des échantillons ainsi prélevés et tamisage au tamis à trous ronds de 2 mm de diamètre, les déterminations suivantes ont été faites au laboratoire :

1° analyse granulométrique sans décalcification, dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium, utilisation de la pipette Robinson jusqu'à 20μ, tamisage à sec pour les particules plus grosses.

2° humidité équivalente par la méthode de Briggs et Mac Lane : eau retenue par le sol lorsqu'une couche de 1 cm d'épaisseur est soumise pendant 40 minutes à une force centrifuge de 1 000 *g*.

3° carbone par oxydation sulfo-chromique selon Anne.

4° azote par Kjeldahl.

5° fer libre suivant la méthode Deb modifiée : réduction du fer des oxydes et hydroxydes par l'hydrosulfite de sodium en présence de tartrate de sodium.

6° mesure du pH (H_2O) au pH-mètre à électrode de verre — rapport terre sur eau 1/2,5 — agitation pendant la mesure.

7° capacité totale d'échange pour les cations (valeur T) par la méthode Riehm-Ulrich, agitation avec l'oxalate d'ammonium en présence de sulfate de baryum et de carbonate de calcium.

8° bases échangeables. Percolation à l'acétate d'ammonium normal et dosage par photométrie de flamme pour Ca, K, Na. Extraction au chlorure de calcium 0,025 N selon SCHACHTCHABEL pour Mg.

RÉSULTATS OBTENUS EN RÉGION GRANITIQUE

1. *Sols bien drainés*

Le schéma 1 illustre la coupe d'un versant de région granitique depuis le sommet jusqu'au ruisseau occupant le bas-fond. Voici la description des profils types :

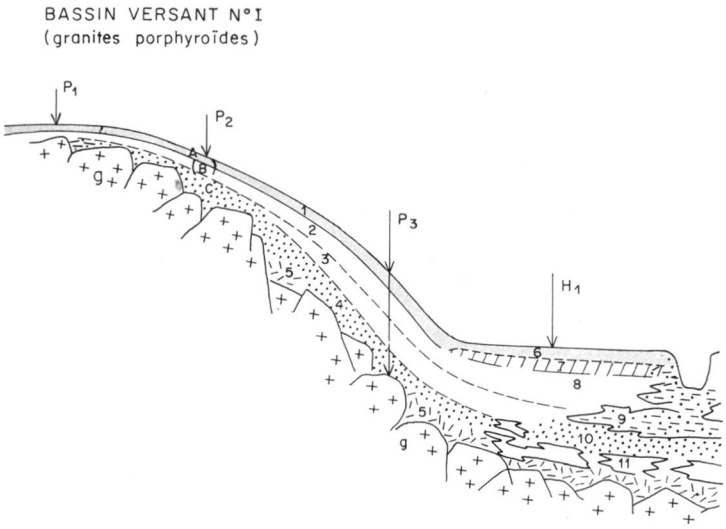


SCHÉMA 1. — *Coupe d'un versant de région granitique*
1. Humifère brun-noir — A.
2. Limono-argileux brunâtre — (B).
3. Limono-argileux ocre-roux — (B).
4. Limono-argilo-graveleux (arène argileuse) — C.
5. Graveleux (arène peu argileuse) — C.
6. Tourbe rousse.
7. Tourbe noire.
8. Argilo-limoneux compact, gris-bleu.
9. Gravelo-argileux à granulométrie hétérogène.
10. Zone de transition avec la roche-mère.
11. Arène kaolinisée.

Sols des sommets (position P_1 du schéma 1).

0-25 à 0-50 : horizon humifère, brun-noir, léger, structure grumeleuse,
au-delà : le granite compact peu ou pas altéré.

Sols des pentes (position P_2).

0-30 : horizon A, brun-noir, très humifère avec présence de racines nombreuses et structure grumeleuse,
30-60 : horizon (B), limono-argileux, brunâtre ou brun-roux, de compacité un peu plus grande. Structure grumeleuse à polyédrique fin,
60-80 : horizon C, graveleux constitué par l'arène.

Sols des bas de pente (position P_3).

L'épaisseur meuble devenant plus importante par suite du colluvionnement, un horizon supplémentaire vient s'intercaler entre (B) et C décrits ci-dessus. Il s'agit d'une couche limono-argileuse de couleur ocre-roux, sans graviers, et de 10 à 60 cm d'épaisseur suivant les cas. Cet horizon contient peu de racines et possède une structure assez compacte, il est moins coloré en brun par la matière organique que l'horizon sus-jacent.

Les horizons A dans ces trois positions topographiques montrent un réseau très dense de racines fasciculées dans les parcelles cultivées mais, sous la lande, ils se différencient en un A_0 de type « moder » ou même « mor » si la lande est ancienne. Sous forêt, on observe aussi une nette tendance vers le « mor » avec ses trois couches L, F, H, la limite entre H et A_1 étant très nette.

Nous donnerons, à présent, à titre d'exemple, la description et les résultats analytiques de quatre profils choisis dans la zone granitique I (B. V. I). Dans la suite de l'exposé, nous nous limiterons, d'ailleurs, à la comparaison des zones géologiques I et II, l'examen des zones III et IV n'apportant pas d'éléments nouveaux, tout au moins du point de vue où nous nous plaçons.

Abréviations utilisées dans les tableaux de résultats

A : argile p. 100 de terre fine séchée à 105°.
Lf : limon fin 2 à 20 μ p. 100 de terre fine séchée à 105°.
Lg : limon grossier 20 à 50 μ p. 100 de terre fine séchée à 105°.
Sf : sable fin 50 à 200 μ p. 100 de terre fine séchée à 105°.
Sg : sable grossier 200 à 2 000 μ p. 100 de terre fine séchée à 105°.
> 2 mm : refus au tamis à 2 mm p. 100 de terre totale.
He : humidité équivalente p. 100 de terre fine séchée à 105°.
C : carbone p. 1 000 de terre fine séchée à 105°.
N : azote p. 1 000 de terre fine séchée à 105°.
Fe : fer libre en Fe p. 1 000 de terre fine séchée à 105°.
Ca, Mg, K, Na : cations échangeables en milliéquivalents pour 100 g de terre fine.
S : somme des cations échangeables en milliéquivalents.
T : capacité totale d'échange en milliéquivalents pour 100 g de terre fine.
V : taux de saturation = S/T × 100.

PROFIL GRANITIQUE n° 1 (I A-10)

Situation de sommet — Position P_2 sur le schéma 1 — Champ cultivé en ray-grass

Description : 0-25 cm : brun noir, humifère, limoneux. Racines fines et denses en bon état. Sonorité au choc : creuse. Grumeleux (1 mm). Présence de galeries de vers de terre. Présence de quartz, feldspath et micas altérés.

25-40 cm : encore humifère mais un peu plus clair. Limono-argilo-graveleux. Sonorité au choc : mate.

> 40 cm : horizon minéral ocre, gravelo-sableux constitué par l'arène.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0-25 cm ...	*13,1*	15,9	24,3	8,8	29,5	20,5	25,5	40,8	3,93	10,4	14,9
25-40 cm ...	*14,1*	18,3	23,8	11,9	25,4	19,3	24,7	21,6	2,35	9,2	14,5
> 40 cm ...	*6,1*	9,8	14,9	18,5	46,2	38,3	15,5	9,6	1,03	9,4	8,2

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0-25 cm ...	*5,65*	4,00	0,33	0,06	0,13	4,52	18,0	*25,1*
25-40 cm ...	*5,70*	1,80	0,15	0,05	0,13	2,13	18,5	*11,5*
> 40 cm ..	*5,75*	0,70	0,02	0,03	0,05	0,78	16,5	*4,7*

Profil granitique n° 2 (I C-9)

Position P_3 sur le schéma 1 — Bas de pente-Pâturage

Description : 0-20 cm : brun, humifère, limono-argileux, grumeleux, minéraux sales (recouverts d'enduits).
20-45 cm : roux, argilo-limoneux.
45-70 cm : plus clair à ocre-roux, argilo-limoneux. Présence de quelques minéraux propres (sans enduits).
70-90 cm : beige, gravelo-sablo-limoneux. Très dur à la tarière. C'est le début de l'arène.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0-20 cm ...	*14,3*	21,0	27,6	12,5	20,3	7,8	25,8	32,8	2,99	10,9	14,5
20-45 cm ...	*13,1*	22,7	39,9	12,2	9,7	4,4	22,4	12,5	1,35	9,2	12,9
45-70 cm ...	*13,1*	26,0	42,4	12,7	6,6	6,8	19,9	5,6	0,68	8,2	14,1
70-90 cm ...	*7,8*	13,4	23,5	38,3	15,8	23,0	16,5	3,4	0,32	10,4	12,6

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0-20 cm ..	*4,70*	0,90	0,17	0,24	0,09	1,40	15,0	*9,3*
20-45 cm ...	*4,80*	0,25	0,02	0,17	0,05	0,49	11,0	*4,4*
45-70 cm ...	*4,80*	0,23	0,08	0,24	0,05	0,60	12,5	*4,8*
70-90 cm ...	*5,00*	0,23	0,10	0,12	0,11	0,56	14,5	*3,8*

PROFIL GRANITIQUE n° 3 (I C-10)

Position P_3 sur le schéma 1 — Bas de pente-Champ cultivé

Description : 0- 30 cm : brun, humifère, limoneux, grumeleux.
30- 40 cm : roux, gravelo-limoneux. Présence de feldspaths et quartz moyens.
40- 85 cm : plus clair, gravelo-sablo-limoneux. Présence de nombreux micas.
85-105 cm : même couleur, sablo-limoneux. Il n'y a presque plus de graviers. Affleurement de blocs de granite porphyroïde dans le champ

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0- 30 cm ..	*12,2*	16,0	24,8	20,2	18,1	14,1	26,4	43,9	3,83	11,4	11,7
30- 40 cm ..	*11,0*	15,7	11,8	16,9	40,6	18,7	21,4	14,2	1,52	9,3	7,8
40- 85 cm ..	*10,7*	8,4	10,7	20,9	46,5	17,8	16,5	5,0	0,56	8,8	4,7
85-105 cm ..	*3,06*	9,2	10,7	26,5	47,4	10,0	14,6	1,8	0,35	5,1	5,7

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0- 30 cm ..	*5,50*	5,40	0,40	0,35	0,12	6,27	17,5	*35,8*
30- 40 cm ..	*4,60*	0,23	0,07	0,16	0,08	0,54	16,0	*3.3*
40- 85 cm ..	*4,50*	0,20	0,05	0,11	0,07	0,43	14,5	*3,0*
85-105 cm ..	*4,40*	0,23	0,03	0,14	0,12	0,52	12,5	*4.1*

PROFIL GRANITIQUE n° 4 (I B-1 *a*)

Position P_2 sur le schéma 1 — Pente-Lande à Ulex *et Pteridium*

Description : 0- 5 cm : brun noir, très humifère. Feutrage de racines (type moder). Sonorité au choc : creuse.
Quartz et feldspaths sales.
5-25 cm : brun noir, humifère, limoneux. Racines moins abondantes. Minéraux sensiblement plus propres.
25-60 cm : brun roux, encore humifère, limono-argilo-sableux. Texture à tendance particulaire. Sonorité au choc : mate.
> 60 cm : légèrement plus clair, gravelo-limoneux puis l'arène argileuse. Feldspaths petits et anguleux.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0- 5 cm ...	*9,7*	12,1	13,2	10,5	28,5	0	44,9	126,4	8,7	14,5	14,1
5-25 cm ...	*9,8*	12,8	16,3	10,2	38,2	16,1	23,8	37,6	4,24	8,9	14,2
25-60 cm ...	*12,9*	16,3	16,6	11,9	35,9	10,4	22,9	17,2	2,11	8,3	13,3
> 60 cm ...	*6,3*	16,0	20,9	11,2	41,8	18,6	15,7	5,2	0,60	8,6	8,1

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0- 5 cm ...	*4,30*	0,94	0,22	0,30	0,13	1,59	27,0	*5,9*
5-25 cm ...	*4,50*	0,10	0,03	0,16	0,05	0,34	20,0	*1,7*
25-60 cm ...	*4,70*	0,10	0,02	0,06	0,07	0,25	18,0	*1,4*
> 60 cm ...	*4,90*	0,10	0,02	0,05	0,08	0,25	12,0	*2,1*

2. *Sols hydromorphes*

Les sols hydromorphes des régions granitiques sont représentés par deux types différents : les sols tourbeux et les sols à gley ; leur profondeur meuble peut aller de 35 à plus de 120 cm et l'eau influence la presque totalité du profil. Sous végétation de *Carex, Erica tetralix, Equisetum, Juncus,* on rencontre des tourbes ou, au moins des sols à gleys.

La coupe type d'un sol tourbeux est celle-ci :

— 0 à 25 ou 30 cm, tourbe rousse à *Sphagnum*. Légèrement limoneux.
— 30 à 60 cm, tourbe noire un peu mieux décomposée.
— 60 à 100 cm, horizon minéral réduit (Gr). Limono-argileux, gris-bleu ou graveleux,
— > 100 cm, la roche-mère, le granite.

La tourbe rousse repose, parfois, directement sur une argile compacte. Dans certains fonds de vallée, un alluvionnement récent de 15 à 20 cm d'épaisseur, limono-argileux humifère, recouvre la tourbe.

Les sols à gleys ont un horizon humifère de 10 à 20 cm d'épaisseur, non tourbeux, surmontant des horizons minéraux bien pourvus en limons. L'alternance de zones où dominent tantôt les taches rouilles et tantôt les taches gris-bleu indique les changements du niveau de la nappe ainsi qu'une hydromorphie temporaire de surface.

La description du profil granitique n° 5 (1 A-2) est un exemple de ces sols.

Profil granitique n° 5 (Hydromorphe) (I A-2)

Situation en fond de vallée, près du ruisseau — Position H_1 sur le schéma 1. Prairie naturelle

Description : 0- 10 cm : couche humifère à nombreuses racines.
10- 60 cm : gley blanc limono-argileux. Présence de quelques taches rouilles et de graviers de quartz et feldspaths.
60-105 cm : gley rouille gravelo-limono-argileux. Présence de quelques taches grises ou gris-bleu et de micas.
105-120 cm : gley encore plus rouille gravelo-limono-argileux, plus sableux.
> 120 cm : arène grise gravelo-sableuse.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0- 10 cm .	*17,3*	26,3	26,8	7,2	14,9	10,0	32,2	37,9	3,43	11,1	10,0
10- 60 cm .	*9,8*	23,4	47,5	6,5	11,6	5,7	19,6	9,6	0,73	13,0	3,8
60-105 cm .	*11,8*	23,6	39,0	10,1	16,7	34,2	18,4	2,12	0,45	4,7	12,8
105-120 cm .	*12,9*	18,2	33,0	11,2	25,4	28,9	18,4	1,93	0,36	5,3	15,6
> 120 cm .	*4,6*	14,7	14,2	17,8	45,6	31,1	16,0	2,64	0,31	8,4	3,6

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0- 10 cm .	*5,15*	0,47	0,17	0,19	0,12	0,95	17,5	*5,9*
10- 60 cm .	*5,20*	0,23	0,15	0,11	0,05	0,54	8,0	*6,7*
60-105 cm .	*5,30*	0,47	0,40	0,22	0,10	1,19	8,4	*14,0*
105-120 cm .	*5,45*	0,70	1,05	0,45	0,12	2,32	9,5	*24,0*
< 120 cm .	*5,55*	0,70	0,85	0,52	0,13	2,20		

Profil granitique n° 6 (Hydromorphe) (I A-4)

Position H_1 sur le schéma 1 — Tourbière

Description : 0- 25 cm : tourbe rousse, toucher gras, peu humide dans l'ensemble, racines plus ou moins décomposées.
25- 40 cm : couleur plus sombre, zone de transition.
40- 60 cm : tourbe noire, toucher plus gras, plus humide.
60-130 cm : limono-argileux sans graviers, humide, couleur gris-clair.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0-25 cm ...	*7,8*	12,6	8,8	4,4	19,2	12,0	81,3	262	14,4	18,1	6,1
40-60 cm ...	*10,7*	17,4	19,5	5,4	3,2	0	52,0	289	12,7	22,7	2,1
Vers 120 cm	*16,6*	26,6	41,4	3,6	3,0	0	24,0	35,4	1,64	21,7	0,6

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0-25 cm ...	*4,75*	6,10	2,40	0,50	0,75	9,76	40,5	*24,0*
40-60 cm ...	*4,85*	6,50	2,00	0,06	0,60	9,16	46,5	*19,7*
Vers 120 cm	*5,45*	3,00	1,60	0,60	0,22	4,98	17,0	*29,0*

RÉSULTATS OBTENUS EN RÉGION SCHISTEUSE

1. *Sols bien drainés*

En parallèle avec les zones granitiques, le schéma 2 illustre la coupe d'un versant de région schisteuse.

Sols des sommets (position P_4 du schéma 2).

0-30 : horizon A, limono-argileux, humifère, brun ou brun sombre. Structure grumeleuse,

30-60 : horizon (B), argilo-limoneux, de couleur plus claire. Structure subpolyédrique. Le passage entre les horizons est graduel,

> 60 : horizon C, schistes bleuâtres ou verdâtres ou grès.

L'horizon humifère repose directement sur la roche-mère dans le cas des grès verts. La profondeur meuble ne dépasse pas 80 cm.

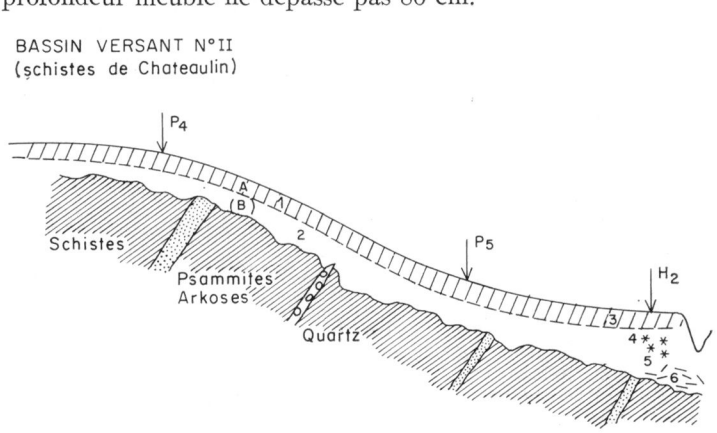


SCHÉMA 2. — *Coupe d'un versant de région schisteuse*
1. Humifère limoneux brun — A.
2. Limono-argileux brun-clair — (B)
3. Humifère limoneux brun-bleu.
4. Concrétions ferrugineuses.
5. Limono-argileux bleu-vert.
6. Couche de graviers ou blocs.

Sols des pentes (position P_5).

Ils présentent deux horizons distincts, lorsque le sol du sommet correspondant n'en présente qu'un. On a en général :

0-30 : horizon A, limono-argileux humifère, brun à brun foncé. Structure grumeleuse,

30-70 : horizon (B), brun clair à tendance plus argileuse. Structure subpolyédrique. Les éléments grossiers sont constitués par quelques graviers de quartz blanc, de schistes ou de grès,

au-delà de 70 : horizon C, les schistes.

La profondeur meuble dépasse rarement 1 m à 1, 20 m.

Nous donnerons ci-dessous la description et les résultats analytiques correspondant à quatre profils de la zone des schistes carbonifères (B. V. II).

Profil schisteux n° 1 (II C-6 *b*)

Situation de sommet — Position P_4 sur le schéma 2 — Champ cultivé

Description : 0-25 cm : brun à brun sombre, limono-argileux.
25-40 cm : plus clair, plus rougeâtre. Présence de quelques graviers de grès vert.
40-45 cm : substratum ; grès vert altéré. Assez dur à la tarière.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0-20 cm ...	*14,3*	32,8	28,1	10,2	8,18	6,7	29,1	30,1	2,98	10,1	19,0
25-40 cm ...	*16,5*	36,7	22,9	9,7	10,2	13,6	27,9	15,8	1,86	8,4	20,8

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0-20 cm ...	*5,40*	2,58	0,20	0,09	0,09	2,96	14,5	*20,4*
25-40 cm ...	*5,10*	0,47	0,02	0,08	0,07	0,64	11,5	*5,5*

Profil schisteux n° 2 (II-C-4 *a*)

Position P_5 sur le schéma 2 — Bas de pente — Pâturage

Description : 0- 45 cm : roux sombre, limono-argileux. Présence de grains de quartz subanguleux et propres de 1 mm et de plaquettes de schistes bleus.
45- 85 cm : brun clair, argilo-limoneux.
85-100 cm : vert-bleu clair, argilo-limoneux, talqueux. Présence de débris frais de schistes.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0-45 cm ..	*18,6*	38,4	26,1	7,1	4,1	2,1	32,7	24,0	2,47	9,7	21,7
45- 85 cm ..	*20,9*	41,7	28,5	4,0	1,5	0	29,3	3,87	0,78	4,9	19,9
85-100 cm ..	*12,8*	58,6	16,2	4,5	3,5	0	35,3	4,14	0,89	4,6	13,7

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0- 45 cm ..	*5,20*	2,11	0,19	0,11	0,09	2,50	17,5	*14,2*
45- 85 cm ..	*4,90*	0,70	0,07	0,09	0,05	0,91	8,5	*10,7*
85-100 cm ..	*4,90*	0,47	0,04	0,06	0,04	0,61	6,5	*9,4*

Profil schisteux n° 3 (II D-25)

Position P_5 sur le schéma 2 — Bas de pente — Champ cultivé

Description : 0- 30 cm : brun à brun clair, limono-argileux. Grumeleux à polyédrique. Présence de grains de quartz de 2 à 10 mm et de schistes.
30- 90 cm : plus sombre, argilo-limoneux. Schistes gréseux verdâtres. Gros blocs de quartz.
90-100 cm : verdâtre, argilo-limono-graveleux. Débris frais de schistes.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0- 30 cm ..	*21,2*	35,5	17,4	9,7	11,2	7,3	29,5	23,8	2,66	8,9	22,5
30- 90 cm ..	*23,4*	36,9	17,8	9,7	10,2	10,6	25,2	9,47	1,31	7,1	22,0
90-100 cm ..	*19,0*	35,4	16,3	12,2	15,2	27,2	23,9	9,05	1,22	7,4	22,8

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0- 30 cm ..	*5,40*	3,2	0,38	0,24	0,20	4,02	12,5	*32,2*
30- 90 cm ..	*5,75*	2,8	0,69	0,14	0,15	3,78	12,0	*31,5*
90-100 cm ..	*5,80*	1,4	0,46	0,08	0,15	2,09	10,5	*19,5*

Profil schisteux n° 4 (II D-5)

Position P_5 sur le schéma 2 — Bas de pente — Taillis de Quercus, Fagus, Carpinus betulus — *Sous-bois de* Pteridium, Ulex, Vaccinium

Description : 0- 5 cm : brun sombre, très humifère avec nombreuses racines de toutes tailles (type moder).
5-40 cm : brun à tendance rougeâtre, limono-argileux. Structure grumelo-polyédrique. Fragments de schistes assez durs.
40-70 cm : brun argilo-limono-graveleux. Graviers ou plaquettes de phyllades.
> 70 cm : schistes tachetés et ferrugineux.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0- 5 cm ...	*17,5*	32,2	13,1	5,7	13,1	8,8	38,9	103,2	6,22	16,5	29,7
5-40 cm ...	*11,0*	45,5	14,4	7,2	19,0	12,8	27,4	20,7	1,23	16,8	47,3
40-70 cm ...	*16,8*	36,2	14,5	7,2	22,2	10,6	22,3	7,86	0,62	12,6	43,4

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0- 5 cm ...	*4,20*	0,70	0,49	0,64	0,38	2,21	24,5	*9,0*
5-40 cm ...	*4,70*	0,23	0,12	0,09	0,08	0,52	12,5	*4,1*
40-70 cm ...	*4,40*	0,47	0,17	0,05	0,11	0,80	15,0	*5,3*

2. *Sols hydromorphes*

Sous un horizon humifère de prairie naturelle nettement aéré, on trouve des horizons gris-bleu réduits, des taches ou traînées rouilles, des concrétions ferrugineuses puis une couche de granulométrie grossière au contact de la roche-mère schisteuse plus ou moins altérée. Le schéma général des sols de bas-fond, en région schisteuse, peut être représenté ainsi :

0- 20 : horizon A, humifère limoneux, brun,
20- 30 : horizon g_0, limoneux encore humifère avec présence de taches rouilles sur fond gris-bleu,
30- 50 : horizon g_r, limono-argileux gris-bleu,
50- 80 : horizon G_0, présence de taches rouilles et de concrétions ferrugineuses sur fond gris-bleu,
80-100 : horizon G_r, limono-argileux, gris-bleu,
100-120 : horizon de transition sableux ou graveleux, gris-bleu,
> 120 : horizon C, les schistes.

Il apparaît donc une hydromorphie temporaire de surface (horizons g_0 et g_r), puis une hydromorphie profonde plus accusée mais irrégulière responsable des concrétions ferromanganésifères marquant le niveau de battement de la nappe (horizons G_0 et G_r).

PROFIL SCHISTEUX n° 5 (HYDROMORPHE) (II C-20)

Fond de vallée, près du ruisseau — Position H_2 sur le schéma 2 — Prairie naturelle

Description : 0-30 cm : horizon argilo-limoneux, gris-bleu. Racines saines mais roussâtres.
30-45 cm : couleur brune par de faibles concentrations de fer ferrique.
45-60 cm : accumulations ferrugineuses plus sombres (brun sale) et plus dures donnant l'impression de graviers.
60-75 cm : horizon bleu-vert, gravelo-limono-argileux. Présence de quelques taches rouilles.
75-85 cm : schistes bleu-verdâtres à cassure fraîche.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0-30 cm ...	*19,9*	47,6	16,3	7,6	4,1	3,3	36,6	21,5	2,57	8,3	9,5
30-45 cm ...	*15,3*	33,6	26,0	10,7	8,1	5,3	27,6	14,0	1,74	8,0	21,4
45-60 cm ...	*14,7*	34,3	25,4	13,2	8,1	4,6	25,0	8,65	1,20	7,2	20,1
60-75 cm ...	*14,2*	40,5	18,2	15,7	8,6	3,7	24,0	4,76	0,82	5,8	10,5

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0-80 cm ...	*5,5*	2,11	1,17	0,38	0,20	3,86	13,0	*29,6*
30-45 cm ...	*5,7*	1,80	1,01	0,41	0,18	3,40	10,5	*32,4*
45-60 cm ...	*5,8*	1,17	0,83	0,35	0,15	2,50	9,5	*26,3*
60-75 cm ...	*5,7*	0,90	0,66	0,27	0,12	1,95	6,5	*30,0*

Profil schisteux n° 6 (Hydromorphe) (II D-20 *b*)

Position H_2 sur le schéma 2 — Prairie naturelle

Description : 0- 20 cm : horizon brun, humifère, limono-argileux. Racines saines à peine roussâtres.
20- 35 cm : gley gris, bleu-clair à blanchâtre. Argilo-limoneux.
35- 75 cm : gley rouille. Taches rouilles sur fond gris-bleu. Concrétions ferrugineuses donnant une texture graveleuse.
75-150 cm : gley gris, bleu-clair à taches rouilles diffuses. Quartz subanguleux de 1 à 30 mm.

Résultats analytiques

	A	Lf	Lg	Sf	Sg	> 2 mm	He	C	N	C/N	Fe
0-20 cm ...	*19,0*	34,4	25,1	6,7	6,7	7,3	34,2	30,8	3,38	9,11	15,6
20-35 cm ...	*21,3*	34,8	24,4	8,6	9,6	11,2	25,1	10,4	1,39	7,48	11,8
35-75 cm ...	*19,5*	34,1	21,9	10,2	13,7	21,9	22,4	7,43	1,08	6,87	48,8
75-150 cm ..	*14,4*	36,3	29,0	13,7	7,1	7,5	23,5	2,23	0,62	3,59	29,5

Complexe d'échange

	pH	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
0- 20 cm ..	*5,4*	5,40	0,73	0,36	0,19	6,68	15,0	*44,5*
20- 35 cm ..	*5,4*	1,88	0,59	0,08	0,15	2,70	10,5	*25,6*
35- 75 cm ..	*5,5*	2,11	0,55	0,06	0,13	2,85	8,0	*35,6*
75-150 cm...	*5,9*	3,2	2,59	0,05	0,13	5,97	9,5	*62,8*

DISCUSSION

1. *Granulométries comparées*

Passons en revue les principales classes granulométriques :

Argile. — Sur granite, le pourcentage d'argile des couches arables est souvent compris entre 10 et 12 p. 100. Pour 68 échantillons comprenant à la fois des couches arables et des horizons minéraux, la moyenne arithmétique est :

10,77 p. 100 $\pm$ 4,24 (4,24 est l'écart-type de la distribution).

Sur schiste, le pourcentage d'argile des couches arables est souvent compris entre 15 et 18 p. 100. Pour 48 échantillons comprenant à la fois des couches arables et des horizons minéraux, la moyenne arithmétique est :

17,41 p. 100 ± 3,37 (3,37 est l'écart-type de la distribution).

Les sols granitiques sont donc faiblement pourvus en argile, alors que les sols schisteux en sont modérément pourvus.

Limon fin. — Sa proportion est moyenne sur granite (12 à 20 p. 100) mais élevée sur schiste (30 à 35 p. 100).

Les moyennes pour les échantillons déjà cités à propos de l'argile sont :

sur granite :

15,38 p. 100 ± 5,07,

sur schiste :

32,92 p. 100 ± 7,04.

Il apparaît donc ici une différence fondamentale entre les deux types de granulométrie ; différence encore plus nette que celle observée pour l'argile.

Limon grossier. — Son pourcentage est très variable sur granite (15 à 30 p. 100) mais compris, généralement, entre 20 et 35 p. 100 sur schistes. Les moyennes sont cependant très voisines l'une de l'autre :

sur granite :

20,59 p. 100 ± 9,88,

sur schiste :

20,20 p. 100 ± 8,44.

Il existe donc un décalage entre les courbes de distribution.

Sable fin. — Le sable fin est toujours de l'ordre de 10 p. 100 quelque soit la roche.

Sable grossier. — Toujours très abondant sur granite (20 à 30 p. 100), il l'est moins sur schiste (5 à 10 p. 100) mais peut atteindre parfois 20 p. 100.

Refus à 2 mm. — Il est, en général, plus important sur granite (10 à 25 p. 100) contre 1 à 10 p. 100 sur schiste.

Si l'on considère la somme argile + limon fin, on constate qu'elle varie entre 25 et 40 p. 100 sur granite mais qu'elle atteint 45 à 60 p. 100 sur schiste. La somme des deux limons, soient les particules de 2 à 50 μ est, généralement, comprise entre 35 et 55 p. 100 dans le premier cas et entre 55 et 65 p. 100 dans le second cas.

D'après le *diagramme de texture* proposé par le Laboratoire des Sols I. N. R. A. de Versailles, en octobre 1963, nous obtenons les définitions suivantes : texture sablo-limoneuse (S. l.) à limoneuse (l.) pour les sols granitiques, texture allant du limon (l) au limon argileux (L. A.) pour les sols schisteux.

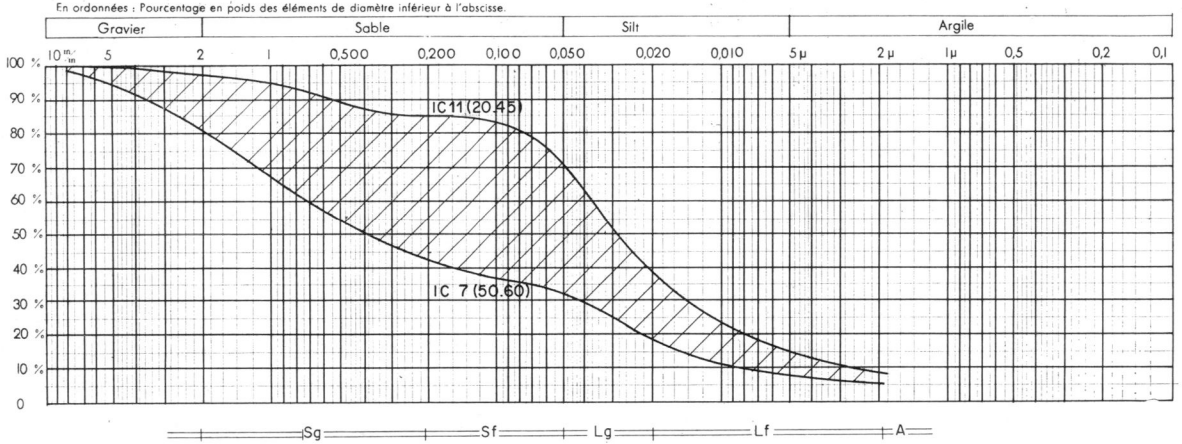
Quelques analyses granulométriques continues (tamisage de 10 mm à 80 μ, densimétrie pour les diamètres inférieurs, méthode Bouyoucos avec pour dispersant l'oxalate d'ammonium) ont été effectuées par le Laboratoire de Mécanique des Sols du C. R. E. G. R. d'Antony. Les figures 1 et 2 représentent *les courbes cumulatives* obtenues.

CENTRE DE RECHERCHES ET D'EXPÉRIMENTATION DE GÉNIE RURAL

LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DES SOLS — **ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES**

Echantillon n°_____ Sondage N°_____

Provenance Bassin versant n° I. Granites Profondeur_____



Feuille n° I Date_____

FIG. 1. — *Bassin versant N° I sur granites. Courbes cumulatives des sols granitiques*

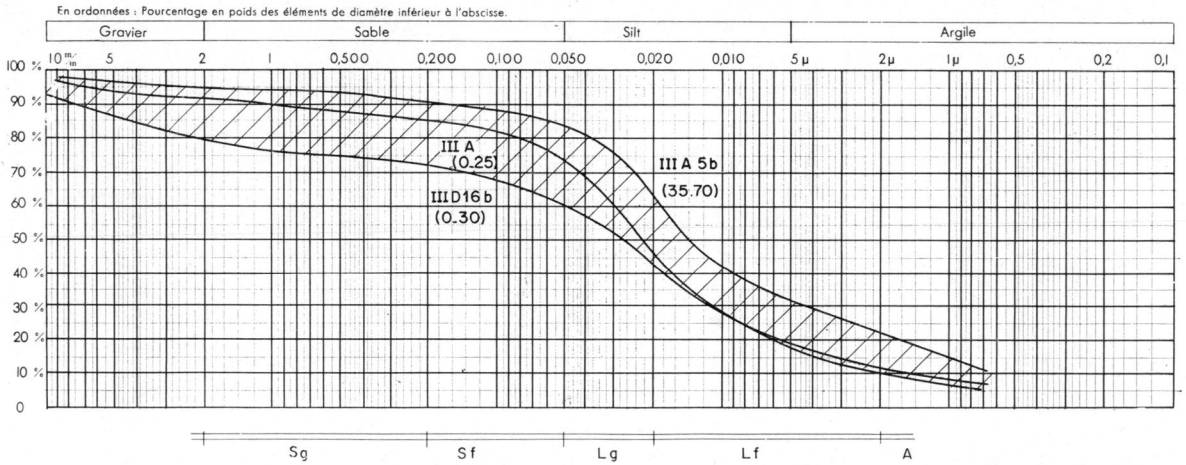
La surface hachurée rend compte des résultats de 8 courbes, les horizons profonds, aréniques, se rapprochent du type sableux avec une courbe concave comme celle de la limite inférieure de la surface (horizon I C-7, 50-60 cm) ; les horizons de surface se rapprochent de la courbe en S de type limoneux, avec des points d'inflexion à 10 et 50 µ (horizon I C-11, 20-45cm)

CENTRE DE RECHERCHES ET D'EXPÉRIMENTATION DE GÉNIE RURAL

LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DES SOLS — **ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES**

Echantillon n° _____ Sondage N° _____

Provenance Bassin versant n° III. Schistes Profondeur _____



Feuille n° 1 Date _____

FIG. 2 — *Bassin n° III sur schistes. Courbes cumulatives des sols schisteux*

La zone hachurée est moins large, bien que rendant compte du résultat de 16 courbes, il n'y a pas de différence marquée entre horizons profonds et horizons de surface. Les courbes sont en S, voisines du type limoneux, avec inflexion à 10 et à 50 µ.

Les sols des régions de schistes métamorphisés ont des caractéristiques intermédiaires entre les deux grandes catégories que nous venons de définir.

Le système de représentation géométrique, proposé par R. BÉTRÉMIEUX (1965), (figure 3) permet une très bonne différenciation. Les croix renforcées pour le granite et les cercles renforcés pour le schiste sont établis à partir des compositions moyennes rapportées à 100 p. 100 de matière minérale, soit respectivement :

$$A = 14 ; Lf = 18 ; Lg = 24 ; Sf = 11 ; Sg = 33$$

et

$$A = 20 ; Lf = 37 ; Lg = 23 ; Sf = 11 ; Sg = 9.$$

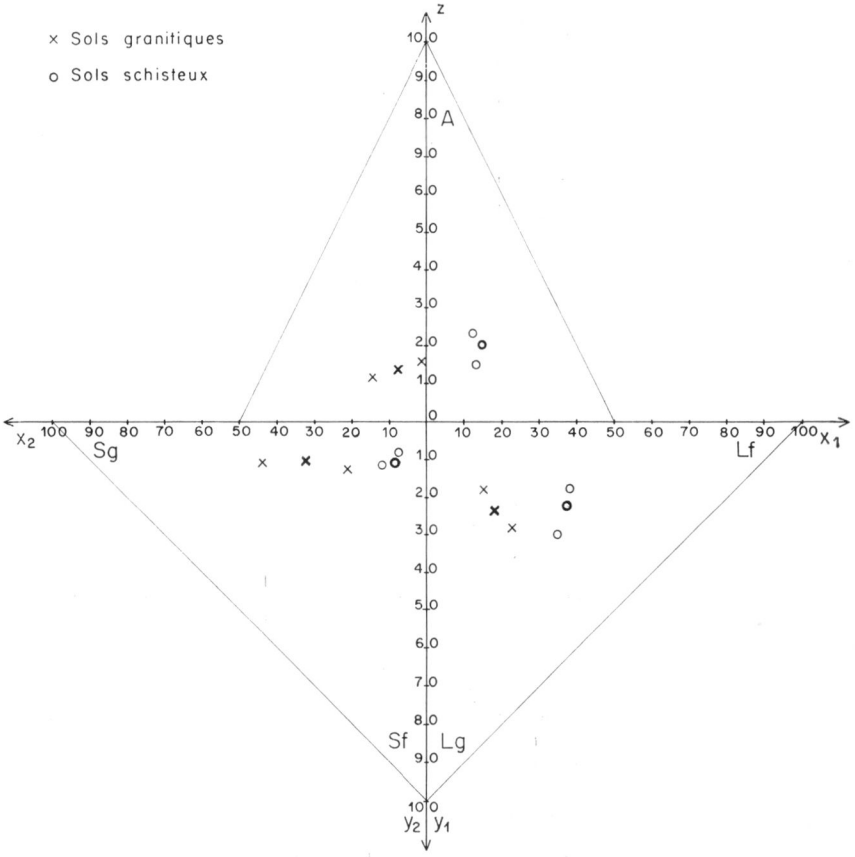


FIG. 3. — *Représentation géométrique de la granulométrie des sols* (selon R. BÉTRÉMIEUX)

Les croix et cercles normaux sont établis à partir des profils décrits ci-dessus : granitiques 2 et 4, schisteux 1 et 3.

Ces différentes données chiffrées concrétisant les observations des agriculteurs à savoir, qu'en région granitique, les sols sont légers, sableux et graveleux, faciles à travailler car, de plus, très riches en matière organique. En région schisteuse, les sols sont plus lourds mais encore faciles à travailler malgré une proportion élevée de

limon fin et ceci, grâce à une teneur en matière organique généralement supérieure à 5 p. 100. Des problèmes de travail du sol (prises en masse) commencent, cependant, à se poser depuis l'emploi généralisé des tracteurs, là où le taux de matière organique s'est abaissé pour se rapprocher de 4 p. 100.

2. *Variations de l'argile avec la profondeur*

Si l'on considère l'ensemble du profil, on voit le pourcentage d'argile diminuer assez régulièrement avec la profondeur pour atteindre moins de 5 p. 100 dans l'arène granitique. Sur schiste, on observe seulement une légère diminution à la rencontre de la roche-mère altérée.

Dans un peu plus de la moitié des cas, cependant, le taux d'argile est plus élevé dans la couche 25-50 cm que dans la couche 0-25 cm, les indices de lessivage restant très faibles.

B. V. I — Granite : pour 15 profils où le lessivage est supposé, l'*indice d'entraînement moyen est de 1,14*, avec comme extrêmes 1,04 et 1,34. Le calcul a été fait à partir des teneurs en argile rapportées à 100 parties de matière minérale pour éliminer l'influence de la forte quantité de matière organique en 0-25 par rapport à 25-50.

B. V. II — Schistes : pour 10 profils où le lessivage est supposé, l'*indice d'entraînement moyen est de 1,13*, avec comme extrêmes 1,06 et 1,27.

Ces valeurs sont donc toujours inférieures à 1,4, limite supérieure adoptée pour le groupe des sols bruns.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ce très faible lessivage vertical de l'argile malgré une quantité d'eau drainée parfois supérieure à 400 mm et, particulièrement, une très bonne structure grumeleuse des horizons superficiels ainsi qu'une répartition régulière des pluies sans chutes brutales.

Les variations des taux de fer libre confirment la faiblesse du lessivage de l'argile et, d'ailleurs, ces variations ne sont pas obligatoirement parallèles à celles de l'argile. A titre d'indication, Fe p. 1 000 est compris entre 10 et 15 sur granite mais entre 15 et 30 sur schiste.

Avant d'aborder la composition chimique, signalons encore que les sols paraissent être en place ou n'avoir subi que de faibles déplacements sous l'influence de phénomènes de solifluxion, par exemple. Sur schistes, les sols des pentes sont bien issus de l'altération de la roche-mère et non d'origine lointaine mais certains d'entre eux ont peut-être subi des déplacements comme tend à le prouver la présence de graviers de quartz ou de schistes répartis dans toute l'épaisseur meuble.

3. *Humidité équivalente*

A partir de nos résultats analytiques, nous avons effectué l'analyse progressive de variance pour les cinq variables : azote p. 1 000 de terre fine séchée à l'air, argile p. 100 de terre fine séchée à l'air, limon fin p. 100, limon grossier p. 100 et humidité équivalente p. 100 de terre fine séchée à 105° (1).

(1) Calcul effectué par M. ARNOUX, Directeur du Service de Biométrie de l'I. N. R. A., que nous tenons à remercier ici.

Pour 68 échantillons granitiques comprenant des couches humifères et des horizons minéraux, la gamme des teneurs en azote va de 0,5 p. 1 000 à 9 p. 1 000 (moyenne 2,53 p. 1 000 ± 2,28), celle des teneurs en argile de 4 à 15 p. 100 (moyenne 10,77 p. 100 ± 4,24). La moyenne des valeurs de l'humidité équivalente est 23,08 ± 6,64.

Pour 48 échantillons schisteux, la gamme des teneurs en azote va de 0,5 p. 1 000 à 5,9 p. 1 000 (moyenne 2,10 p. 1 000 ± 1,28), celle des teneurs en argile de 11 à 23 p. 100 (moyenne 17,41 p. 100 ± 3,37). La moyenne des valeurs de l'humidité équivalente est 27,95 p. 100 ± 4,63.

Il apparaît donc très nettement que pour des teneurs moyennes en azote assez voisines, l'humidité équivalente est bien supérieure sur les schistes. La figure 4, qui indique les variations de He par rapport à N, illustre encore mieux l'influence des éléments fins des schistes.

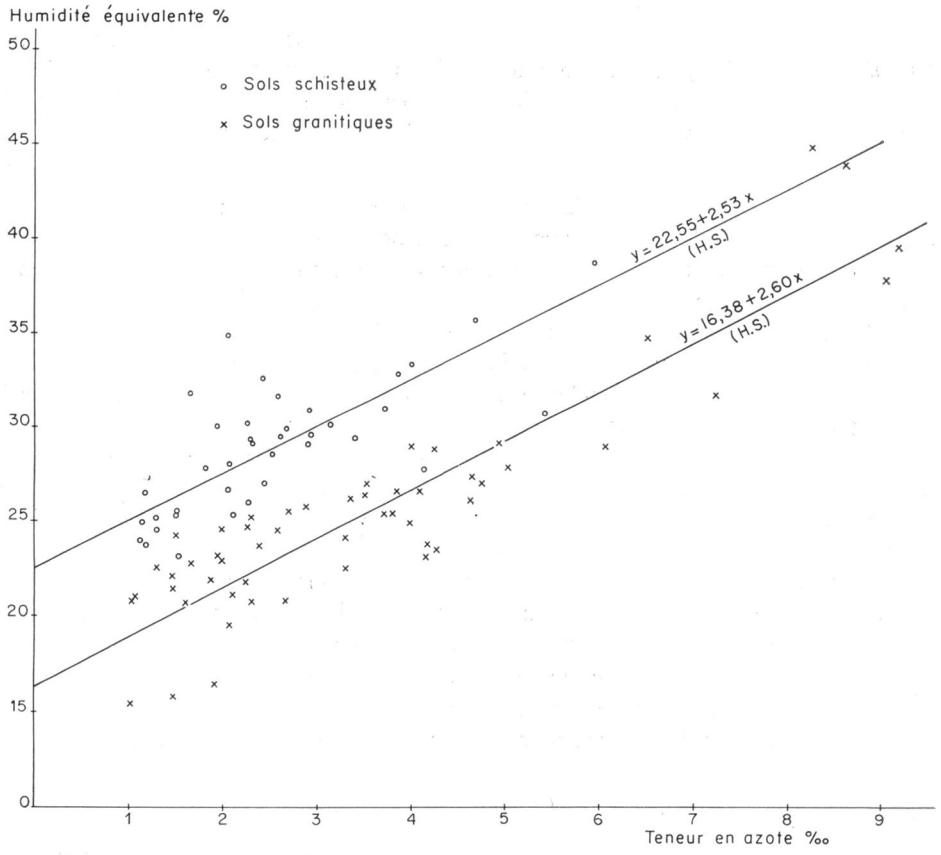


FIG. 4. — *Régression de l'humidité équivalente des sols en fonction de leur teneur en azote total*

Les formules de régression déduites de l'analyse progressive de variance donnent :

sur granites :

$$He = 9{,}15 + 2{,}76\ N + 0{,}31\ A + 0{,}23\ Lf,$$

sur schistes :

$$He = 3{,}53 + 3{,}10\ N + 0{,}36\ A + 0{,}35\ Lf.$$

Il serait plus normal d'exprimer l'azote en matière organique puisque c'est la matière organique qui est un constituant du sol. En utilisant la relation N × 20 = matière organique totale, cela nous amène à diviser les coefficients de l'azote par 20 et les formules deviennent :

sur granites :

$$He = 9{,}15 + 0{,}138\ M.O. + 0{,}31\ A + 0{,}23\ Lf,$$

sur schistes :

$$He = 3{,}53 + 0{,}155\ M.O. + 0{,}36\ A + 0{,}35\ Lf.$$

L'influence de la matière organique est environ deux fois plus faible que celle de l'argile et du limon fin et ceci pour les deux catégories de sols. Schématiquement nous avons :

part des éléments minéraux :

$$0{,}31\ A + 0{,}32\ Lf = 6 \text{ à } 7 \text{ dans le premier cas (granites)}$$

plus facteur constant :

$$9{,}15, \text{ soit } 15 \text{ à } 16$$

part des éléments minéraux :

$$0{,}36\ A + 0{,}35\ Lf = 16 \text{ à } 18 \text{ dans le second cas (schistes)}$$

plus facteur constant :

$$3{,}53, \text{ soit } 19{,}5 \text{ à } 21{,}5.$$

Ensuite, l'effet matière organique joue sensiblement avec le même coefficient d'où un écart constant d'environ 5 points au bénéfice des schistes.

Le calcul de la régression simple (fig. 4) entre He et N, effectué uniquement pour des horizons dont la teneur en azote est supérieure à 1 p. 1 000 donne :

sur granites :

$$He = 16{,}38 + 2{,}60\ N \quad (H.S.)$$

sur schistes :

$$He = 22{,}55 + 2{,}53\ N \quad (H.S.)$$

Ces équations de régression confirment, d'une part, l'égalité des coefficients à appliquer à la matière organique quelle que soit la catégorie de sols considérée, d'autre part, l'écart entre les humidités équivalentes moyennes, ici environ 6 contre 5 par le calcul de la régression multiple. En pratique, on peut retenir qu'un sol cultivé à 2,5 p. 1 000 d'azote total aura une humidité équivalente de 25 p. 100 s'il s'agit d'un sol granitique mais de 30 p. 100 s'il s'agit d'un sol schisteux. On remarquera aussi qu'une terre granitique à 10-12 p. 100 d'argile et 35 p. 100 de limons (2-50 μ) mais à 4 p. 1 000 d'azote, ce qui est le cas des terres nouvellement mises en culture, aura la même humidité équivalente (28 p. 100) qu'une terre schisteuse à 15-17 p. 100 d'argile et 60 p. 100 de limons mais à 2 p. 1 000 seulement d'azote.

4. *Complexe d'échange*

a) *Acidité actuelle — pH* (H_2O).

Dans les horizons humifères des sols non cultivés (bois, landes), le pH descend aux environs de *4*, mais il remonte vers *5* à l'approche de la roche-mère. Il n'apparaît pas de différences nettes entre les diverses zones géologiques, les chiffres sont d'ailleurs dispersés jusqu'à $\pm$ 0,5 unité par rapport aux deux valeurs données ci-dessus. Beaucoup de couches arables de parcelles cultivées présentent encore des pH inférieurs à 6.

b) *Cations échangeables — Ca, Mg, K, Na.*

L'examen des résultats analytiques se rapportant à l'ensemble de l'étude, et non pas seulement aux 12 profils décrits plus haut, nous amène à fixer les écarts résumés ci-dessous et exprimés en milliéquivalents pour 100 g de terre fine.

Horizons minéraux des profils bien drainés.

Il s'agit d'horizons situés à plus de 40 cm de profondeur de manière à éliminer l'influence des horizons humifères dans le cas des sols non cultivés et l'influence des amendements et engrais dans le cas des sols cultivés.

	Sols granitiques	Sols schisteux
Ca	0,10- 0,50	0,20- 1,20
Mg	0,05- 0,15	0,05- 0,50
K	0,03- 0,10	0,04- 0,10
Na	0,05- 0,10	0,05- 0,15
S	0,23- 0,85	0,34- 1,95
T	8,00-12,00	6,00- 8,00
V	*2,90- 7,00*	*5,70-25,0*

Sur granite, Ca échangeable représente, approximativement, la moitié de la somme totale des bases échangeables S, les teneurs en Mg, K et Na étant très voisines les unes des autres. Sur schistes, certains profils ont la même composition mais, d'autres voient leur Mg multiplié par trois et leur Ca multiplié par deux.

Horizons minéraux des profils hydromorphes des bas-fonds.

Ces chiffres sont valables pour les régions schisteuses et granitiques et, en particulier, pour les horizons minéraux des profils tourbeux.

	Sols granitiques et schisteux
Ca	1,00- 3,00
Mg	0,40- 1,00
K	0,05- 0,10
Na	0,10- 0,20
S	1,55- 4,30
T	5,0- 10,0
V	*30,0- 40,0*

Les cations échangeables, surtout Ca et Mg, sont beaucoup plus abondants dans les dépressions, témoignant de l'importance de leur entraînement par les eaux. De ce fait, le pourcentage de saturation se distingue nettement des sols normalement

drainés impliquant ainsi des acidités moins fortes. Les pH inférieurs à 5 sont rares ; ils atteignent parfois 6.

Couches arables — horizons 0-20 ou 0-25 des parcelles cultivées.

	Sols granitiques	Sols schisteux
Ca	1,40- 8,00	2,10- 9,50
Mg	0,15- 0,50	0,20- 0,50
K	0,10- 0,30	0,10- 0,60
Na	0,10- 0,15	0,10- 0,20
S	1,75- 8,95	2,50-10,80
T	15,0- 18,0	11,0- 15,0
V	*11,5- 50,0*	*23,0- 72,0*

Ici, ce sont les apports d'amendements calcaires et d'engrais qui conditionnent les cations échangeables. Si les sols schisteux paraissent un peu plus enrichis en Ca et K, cela signifie qu'ils proviennent de régions où la fertilisation est plus poussée. L'ordre des cations par teneur décroissante est Ca, Mg, K, Na, le calcium représentant une très forte proportion de S. Par rapport aux horizons minéraux, les couches arables sont environ dix fois mieux pourvues en Ca et en cations totaux.

Horizons humifères (0 à 5 cm) des bois et landes.

	Sols granitiques	Sols schisteux
Ca	0,30- 1,00	0,20- 0,80
Mg	0,40- 1,00	0,20- 0,70
K	0,30- 0,60	0,30- 0,75
Na	0,15- 0,50	0,20- 0,40
S	1,15- 3,10	0,90- 2,65
T	20,0- 25,0	17,0- 22,0
V	*5,7- 12,5*	*5,3- 12,0*

Pour ces horizons, constitués par les humus naturels (matière organique 25 p. 100), Ca est sensiblement égal à Mg et à K et représente, approximativement, le tiers de la somme des cations.

c) *Capacité totale d'échange pour les cations (T).*

Nous venons de voir dans le dernier tableau la valeur T des humus naturels (17 à 25 méq. pour 100 g). Les couches arables voient leur T s'abaisser à 15-18 méq. sur granite et à 11-15 méq. sur schiste. Pour les horizons minéraux, nous trouvons des valeurs respectives de 8-12 méq. et 6-8 méq.

La matière organique est plus abondante sur granite que sur schiste mais ceci n'explique pas la plus grande capacité d'échange observée car, à égalité d'azote ou de carbone, cette valeur reste nettement plus élevée. Les rapports C/N sont d'ailleurs plus élevés en région granitique :

sur granite	couches arables	: C/N 10 à 11,5	(moyenne 11),
	horizons minéraux	: C/N 8 à 12,	
sur schiste	couches arables	: C/N 8,5 à 12	(moyenne 10),
	horizons minéraux	: C/N 6 à 8.	

A l'intérieur de chacune des deux catégories de sols, la valeur T est nettement en relation avec la teneur en matière organique d'une manière qui se traduit par les formules suivantes (1) :

$$T = 13{,}71 + 0{,}81 \text{ M. O.} - 0{,}09 \text{ Lg (pour les granites)}$$
$$T = 4{,}4 + 0{,}149 \text{ M. O.} + 0{,}1 \text{ Lg (pour les schistes)}$$

En résumé, nous avons des sols granitiques pauvres en argile et à matière organique de C/N élevé, possédant une capacité d'échange supérieure aux sols schisteux mieux pourvus en argile et à matière organique de C/N plus faible.

d) *Taux de saturation (V).*

Le taux de saturation est toujours extrêmement faible dans les horizons minéraux des sols granitiques : V voisin de 5. En sols schisteux, il est rarement inférieur à 10, mais peut atteindre et dépasser 20 car certains profils ont des teneurs nettement plus élevées en Ca et Mg échangeables. Pour des pH (H_2O) compris entre 4,5 et 5,5, les taux de saturation peuvent donc varier de 5 à 25 ; par contre, à l'intérieur de cette zone il n'est pas possible de mettre en évidence une corrélation entre pH et V comme l'a déjà signalé DUCHAUFOUR (1965, p. 85.)

Dans les couches arables, nous notons des valeurs de V toujours supérieures à 10 et pouvant atteindre 50 ou 70 suivant l'intensité des chaulages.

Dans les humus naturels, où le pH est très bas puisqu'il est voisin de 4, le taux de saturation est compris entre 5 et 12 et souvent égal à 8. Une quantité non négligeable de cations (surtout K et Na), provenant des résidus végétaux, vient s'ajouter à Ca et Mg sur le complexe absorbant.

5. *Les Humus naturels*

Quelle que soit la roche-mère, sous taillis de chênes ou de chênes-hêtres-châtaigniers, il se forme, sous la litière, un horizon A_0 de 5 cm d'épaisseur, très humifère, noirâtre à brunâtre, formé de débris de végétaux mal décomposés.

Vient ensuite un horizon A_1 de 5 à 10 cm d'épaisseur, noirâtre, léger, plus ou moins cendreux avec des grains de quartz isolés et des minéraux sans enduits. On y distingue, parfois, de petites zones très cendreuses mais discontinues (quelques millimètres ou quelques centimètres). On y devine toujours un horizon A_2 en voie de formation avec tendance à la migration de composés humiques et ferrugineux.

(1) Ce résultat peut paraître curieux quant à la non intervention de la fraction argileuse, mais, quand on se reporte à l'amplitude des variations des différents facteurs dans la région considérée, on constate que, après la teneur en matière organique, seul le pourcentage de limon grossier présente une gamme de variation suffisante pour que celui-ci domine la dispersion des résultats et impose l'existence d'une corrélation.

Le pH de l'horizon A_0, nous l'avons déjà dit, est voisin de 4 et son rapport C/N est voisin de 15, parfois 20. Morphologiquement, il s'agit d'un *Moder* mais son pH et son taux de saturation (V = 5 à 12) constituent plutôt des valeurs admises pour la caractérisation des *Mor* (DUCHAUFOUR 1965, p. 138).

Sur roches gréseuses et sous lande d'Éricacées, l'humus devient un véritable « humus brut » très épais, de type *Mor*. Dans ce cas, le sol sous-jacent est un podzol humo-ferrugineux très bien développé. Signalons que ce podzol se rencontre également sur granulite en versant nord, près de Quimper par exemple.

Les sols cultivés voient leur humus évoluer vers le *Mull acide* (pH restant inférieur à 7), sous l'influence des amendements calcaires et du travail du sol.

Acides humiques et acides fulviques.

Quelques déterminations ont été faites par la méthode au fluorure de sodium à 1 p. 100 : 10 g d'échantillon dans 100 cm³ de réactif avec agitation intermittente et abandon pendant une nuit. La somme des acides fulviques et humiques, exprimée en pourcentage de matières organiques totales déterminées par perte au feu est la suivante :

humus de podzol, de forêts de conifères et de landes d'éricacées : 4 à 7 p. 100,
humus de forêts feuillues ou mixtes (type *Moder*) : 8 à 20 p. 100,
humus de type *Mull* : ⩾ 20 p. 100.

Les humus hydromorphes.

Les horizons tourbeux, si fréquents dans les dépressions de région granitique, ont une perte au feu de 40 à 50 p. 100 avec une capacité d'échange pour les cations voisine de 40 méq. pour 100 g.

Leurs autres caractères chimiques sont moins mauvais que ceux donnés par DUCHAUFOUR pour les tourbes oligotrophes, pH 4,7-5,0 au lieu de 3,5-4,0,, V = 20-25 au lieu de V < 10, C/N voisin de 15 et légèrement supérieur à 20 dans l'horizon de tourbe noire au lieu de 30-40. Il s'agit pourtant bien de *Tourbes oligotrophes* à *Sphagnum*. L'horizon 30-60, que nous avons qualifié de « tourbe noire », pourrait être un *Hydromor*, formé en période sèche par une certaine évolution de la tourbe.

Les bas-fonds des régions de schistes sont, généralement, occupés par des prairies naturelles dont l'horizon humifère 0-20 a une teneur en azote total de 3 p. 1 000 avec un rapport C/N de l'ordre de 10 mais atteignant parfois 12 et 14. Le taux de saturation est voisin de 25 p. 100 avec un pH compris entre 4,5 et 5. Cet humus serait de type *Hydromull*.

CONCLUSIONS

La prospection pédologique exécutée sur le bassin versant du Blavet, suivie d'analyses granulométriques et chimiques nombreuses et complétée, à l'occasion, par des résultats d'études et observations antérieures permet les conclusions suivantes, valables pour la Bretagne occidentale :

Les éléments fins, argile et surtout limon fin, sont plus abondants dans les sols formés sur roche-mère schisteuse que dans les sols formés sur roche-mère granitique.

Les profondeurs meubles sont du même ordre de grandeur, c'est-à-dire rarement plus de 0,60 m en situation de sommet et rarement plus de 1,20 m en bas de pente.

Du point de vue agronomique, la structure est très bonne et les terres sont faciles à travailler dans leur grande majorité. Sur granite, la texture est elle-même très favorable et, de plus, une forte quantité de matière organique est toujours présente. Sur schiste, c'est la matière organique qui joue le rôle le plus important puisque certains sols deviendraient difficiles si le taux d'humus diminuait.

La filtration de l'eau à travers les profils est bonne et, même sur schiste, on ne voit pas d'hydromorphie due à la texture.

Dans les bas-fonds, l'hydromorphie est générale mais l'existence de *tourbes* sur granite et de profils plus aérés sur schiste est d'autant plus surprenante que l'arène granitique est réputée comme très perméable.

On peut penser que la couche de granulométrie grossière des fonds de vallée schisteux, située immédiatement au-dessus de la roche-mère, permet un certain drainage tandis qu'en pays granitique se produit une kaolinisation des feldspaths avec formation de couches imperméables.

Là où la tourbe n'existe pas, on trouve au moins un pseudogley de surface surmontant les horizons d'un *Sol à gley*.

Pour les profils bien drainés, le lessivage vertical de l'argile est inexistant ou très faible : indice d'entraînement = 1,15.

Le taux de saturation (V), extrêmement faible dans les horizons minéraux des sols granitiques (voisin de 5), devient presque toujours plus élevé dans les horizons minéraux des sols schisteux, tout en demeurant faible et inférieur à 20.

Le climat étant favorable à la formation d'un humus brut très acide, sous forêts, taillis et landes d'Éricacées, nous observons, d'une manière générale, un phénomène de podzolisation net, mais faible, des premiers centimètres du support minéral, ce qui n'est pas en contradiction avec le faible taux de lessivage. Ce phénomène n'affecte les horizons de profondeur supérieure à 20 cm que sur les roches les plus filtrantes, telles les grès et quartzites où se rencontrent les vrais podzols humo-ferrugineux.

Les profils cultivés des régions granitiques, comme des régions schisteuses présentent, actuellement, les caractères de *sols bruns acides* ou de *sols bruns faiblement lessivés*.

Sous végétation naturelle, les sols sont à mettre dans la classe VII des sols à humus brut, groupe des *sols ocre podzoliques* de la classification française (DUCHAUFOUR, 1965, p. 219).

Sur les roches granitiques, ce sol « ocre podzolique » peut être considéré comme un sol de transition vers le podzol puisque l'on trouve, effectivement, des podzols sur granulite, roches les moins bien pourvues en bases, et sur versants nord.

Sur les roches schisteuses, ce stade « ocre podzolique » ne paraît pas devoir être dépassé : nous savons que le taux de saturation est, dans l'ensemble, plus élevé sur ce type de roche.

Sur les sommets de roches dures, les sols seraient de la classe II, à profil peu différencié AC (pauvres en calcium), groupe de Rankers d'érosion : *Rankers* à *Moder* ou à *Mor*.

On peut donc constater que, sous un même climat, ici le climat atlantique, la nature de la roche-mère et l'action conjuguée de la topographie sont les facteurs prépondérants de l'évolution des sols. Il est possible, en effet, de rencontrer, à quelques

centaines de mètres de distance, un véritable podzol sur une formation gréseuse, un sol ocre podzolique sur un schiste et un sol brun-acide à mull sur une amphibolite.

Une autre remarque importante réside dans le fait qu'on trouve des humus aussi acides, de type « moder », avec début de podzolisation sous végétation de feuillus indiquant que, sous climat atlantique, l'influence du climat l'emporte sur l'influence de la nature de la végétation.

Dans le cadre d'un travail de cartographie systématique des sols de ces régions, une attention spéciale se portera sur la nature de la roche-mère puisque c'est d'elle que dépend, en particulier, la texture des horizons de surface ainsi que des horizons profonds.

Au point de vue valeur chimique, on n'observe pas de différences entre sols granitiques et sols schisteux pour le pH, l'acide phosphorique assimilable, la potasse échangeable. Sur schistes, certaines zones sont mieux pourvues en calcium et en magnésium échangeables mais ce fait a peu d'incidence agronomique.

En ce qui concerne les oligo-éléments, par contre, les travaux de la Station d'Agronomie de Quimper ont montré que les granites et granulites de ces régions donnent des sols pauvres en cuivre, cobalt et manganèse, une exception étant à faire pour le granite type « granite de Vire », toutefois peu représenté dans l'ouest du massif armoricain. Les schistes primaires et briovériens fournissent toujours des sols normalement pourvus en ces trois oligo-éléments.

Reçu pour publication en août 1967.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier particulièrement M. S. HÉNIN, Chef du département agronomie de l'I. N. R. A. et M. R. BÉTRÉMIEUX, directeur du laboratoire des sols de Versailles, dont les conseils et suggestions ont été indispensables à la bonne présentation de ce mémoire.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE SURVEY OF THE GRANITE AND SCHISTOSE SOILS OF BRITTANY (THE BLAVET CATCHMENT BASIN)

A pedological survey, including particle-size and chemical analyses, has been carried out throughout the catchment basin of the BLAVET, a coastal river in Brittany.

220 profiles were selected in various topographical attitudes and then described ; 129 of them were analysed, this involving 450 specimens.

The relevant geological areas consist of pseudo-porphyritic and muscovite granites, as well as Carboniferous and Pre-Cambrian shales. Both of these great soil groups include a typical description and the analytical data relating to four well-drained profiles and two hydromorphic profiles of valley plains, which refer, of course, to all 129 profiles.

From the particle-size aspect, the granitic soils may be termed from « sandy/silty » to « silty » (clay : 10 to 12 p. 100, fine-silt particle size (2 to 20 microns) : 12 to 20 p. 100 ; coarse sand : 20 to 30 p. 100), while the schistose soils may be termed from « silty » to « clayey/silty », (clay : 15 to 20 p. 100, fine silt : 30 to 35 p. 100, coarse sand : 5 to 10 p. 100). There is either no or very little upward leaching, (the scouring index not exceeding 1.3). The moisture equivalent depends mostly, in both of these great soil groups, on the total quantity of organic matter therein. The relevant regression equations were resolved.

The exchange complex (Ca, Mg, K, Na) shows very low saturation factors (S/T × 100 = V) for the mineral horizons of granitic soils (V = 5), which are merely low for the mineral horizons of schistose soils, and higher for the same horizons of hydromorphic soils of valley plains (V = 30 to 40).

The cultivated land of all geological areas exhibits the features of either « Brown acid soils » or « Slightly leached Brown soils ».

The climate in the said areas is moist and temperate (annual rainfall from 800 to 1 200 mm, depending on remoteness from the Atlantic coast), the annual mean temperature ranging from 11 to 12°C. The climate thus would promote leaching, presumably, and podzolization. In fact, while leaching is slight for clay, it is clearly indicated for the bases as the value V of the low-ground soils testifies, podzolization being steady but of no great extent. The humus that accumulate under oak and beech forests exhibit the « Moder » morphological features, acidity being strong (pH (H_2O) index = 4, V = 5 to 12, C/N = 15 to 20), while those accumulating under ericaceous moorland become very thick « Mor ». These soils, when on granitic rock, are to be included in class VII, viz., raw-humus soils, yellow podzolic soils, or yet, brown podzolic soils (according to the French classification). Such soils may be considered as a transitional soil leading to podzol since real podzols are actually found, though less often, on the granites lacking more in bases and located on northern slopes.

On schistose rock, this yellow podzolic soil is also found but does not mature to podzol since it is known that the saturation index is higher therein. Atop hard rock, the soils are of class II, with but slightly differentiated profiles, (lacking in calcium), group of « Moder » or « Mor » « rankers ».

When on granite, the hydromorphic soils of valley plains consist chiefly of Oligotrophic Sphagnum Peats, exhibiting but moderate acidity : pH index : 4.7 to 5 ; V = 20 to 25 ; C/N = 15 to 20. When on shale, they consist of a surface pseudo-gley in presence of a humus of the « hydromull » type, and which overlay the horizons with actual gley, brought about by deep though uneven hydromorphic conditions, from which originate ferro-manganous concretions indicating the lower and upper limits of the watertable level.

Under the same climate, (that instanced herein being Atlantic), the type of parent material and topography are jointly the major factors affecting maturation of the soils.

ZUZAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DER GRANITISCHEN UND SCHIEFRIGEN BÖDEN DER BRETAGNE (DAS EINZUGSGEBIET DES BLAVETFLUSSES)

Im Raum des Einzugsgebiets des « Blavetflusses », eines Küstenflusses der Bretagne, wurde eine pedologische Schürfung durchgeführt, gefolgt von Körnchengrössen- und Chemie-Analysen.

Es wurden 220 Bodenprofile in verschiedenen topographischen Stellungen ausgewählt und beschrieben. 129 Profile wurden analysiert. Ingessamt also 450 Muster.

Die betreffenden geologischen Zonen bestehen aus porphyrartigen und zweimikagraniten (Granuliten), sowie aus kohlenhaltigen und brioverischen Schiefern. In jeder dieser zwei hauptsächlichen Bodenkategorien, werden die Beschreibung und die vollständigen analytischen Ergebnisse für 4 gut entwässerte Profile und für 2 hydromorphe Profile der Talböden, als Beispiel vorgeführt. Die allgemeine Erörterung bezieht sich selbstverständlich auf die gesamten 129 Profile.

Bezüglich der Körnchengrössenbestimmung können die granitischen Böden als « lehmsandige » bis « lehmige » (Ton 10-12 p. 100, feiner Lehm von 2 bis 20 μ : 12-20 p. 100, grober Sand 20-30 p. 100), die schieferartigen Böden als « lehmige » bis « tonig-lehmige » (Ton 15-20 p. 100, feiner Lehm 30-35 p. 100, grober Sand 5-10 p. 100) bezeichnet werden. Das senkrechte Auswaschen des Tones ist null oder sehr schwach (Mitnahme-index nicht über 1,3). Das innerliche Feuchtigkeits-Aequivalent im Innern der beiden hauptsächlichen Bodenkategorien hängt grundsätzlich von der Grösse der gesamten anwesenden Stoffe ab. Regressionsberechnungen wurden durchgeführt.

Das Austauschkomplex (Ca, Mg, K, Na) weisst äusserst schwache Sättigungsraten (S/T × 100 = V) für die mineralischen Schichten der granitischen Böden (V = 5), schwache Raten für die mineralischen Schichten der schiefrigen Böden (V = 10 bis 20), grössere Raten für dieselben Schichten der hydromorphen Böden der Talböden (V = 30 bis 40) auf.

Die kultivierten Böden der gesamten geologischen Zonen haben die Eigenschaften von *Braunen sauren Böden* oder *Schwach ausgewaschenen braunen Böden.*

Das Klima dieser Gebiete ist feucht und mässig warm (800 bis 1 200 jährlicher Niederschlagsmenge, je nach der Entfernung der Atlantikküste, mittlere Jahrestemperatur zwischen 11°

und 12°C). Es ist deshalb von vornherein günstig für das Auswaschen und die Podsolierung. Tatsächlich wird ein sehr schwaches Auswaschen des Tones aber ein unzweideutiges Auswaschen der Basen Festgestellt, wie es aus dem Wert V der untersten Bodenschichten, in Anbetracht einer konstanten jedoch schwaschen Podzolierung, hervorgeht. Die Rohhumusmengen, die sich unter Eichen- und Buchenwälder ansammeln, zeigen die morphologischen Eigenschaften von *Moder* und einen ausgeprägten Säuregrad (pH (H_2O) = 4, V = 5 bis 12, C/N = 15 bis 20). Unter den heidekrautartigen Pflanzen werden sie sehr dicker Auflagehumus (*Mor*). Auf dem granitischen Gestein sind die Böden der Klasse VII zuzuzählen, Rohhumusböden, Gruppe der *podzoligen ockerfarbigen Waldböden*, in der französischen Klassifiezierung auch *podzoligen braunen Böden* genannt. Dieser Boden kann wie ein Uebergangsboden zu dem Podzol betrachtet werden, da richtige Podzolböden auf den armsten Graniten in den Basen und auf nördlichen Abhängen tatsächlich, aber sel tener, gefunden werden.

Auf dem schiefrigen Gestein ist dieser *podzoliger ockerfarbige Waldboden* auch vorhanden, aber er entwickelt sich nicht zum Podzol. Wir wissen nämlich, dass der Sättigungsgrad dabei höher ist. Auf den Höhen des harten Gesteins, gehören die Böden der Klasse II mit sparsam differentiiertem (Kalciumarmen) Profil AC, Gruppe der Erosions-Rankers : *Rankers mit Moder* oder mit *Mor* an.

Die hydromorphen, am Boden der Täler, auf Granit liegenden Böden bestehen meistens aus *oligotrophen Torfen mit Sphagnum*, deren Eigenschaften an Säuregehalt mässig sind : pH = 4,7 — 5,0. V = 20-25, C/N = 15 — 20. Auf Sihiefern handelt es sich um einen oberflächlichen Pseudo-Gley in Anwesenheit eines Humus des Typus *Hydromull* ; ausserdem, sind die Horizonte durch einen richtigen *Gley* gekrönt, der durch eine tiefe aber unregelmässige Hydromorphie verursacht wird, welche für die Bildung von ferromanganhaltigen Konkretionen verantwortlich ist, die die Standsebene des Grundwassers anzeigen.

Unter demselben Klima, hier das Atlantikiklima, sind de Beschaffenheit des Muttergesteins und die konjugierte Wirkung der Topographie die überwiegenden Faktoren der Bodenevolution.

РЕЗЮМЕ

К изучению гранитических и сланцевых почв Бретани.

(Водосборный бассейн речки Блавэ).

М. КОППЕНЭ, А. РАМПОН.

Авторы провели педологические исследования, с последующими химическими и гранулометрическими анализами, на всем протяжении водосборного бассейна Блавэ, — речки бретонского поморья.

Они выбрали 220 топографически различно расположенных профилей и подробно их описали; 129 профилей были проанализированы (450 проб).

Геологические зоны о которых идет речь, представляют из себя порфироидные граниты, граниты в 2 слюды (гранулиты) и сланцы каменноугольного и бриоверийского периодов. В обсуждении разбираются, конечно, все 129 профилей, но для каждой из трех указанных крупных категорий почв дается, для примера, полное описание и результаты анализов четырех хорошо осушенных, и двух гидроморфных профилей дна долины.

С точки зрения гранулометрии, гранитические почвы могут быть отнесены в разряд от « супесей » до « суглинков » (глина 10-12 %, мелкие наносы от 2 до 20 мм : 12-20 %, грубый песок 20-30 %), сланцы — к категории от « суглинков » до « тяжелых суглинков » (глина 15-20 %, мелкие наносы 30-35 %, грубый песок 5-10 %). Вертикальное выщелачивание глины, или не существует, или оно весьма слабо (индекс вымывания не превышает 1,3). Эквивалентная влажность внутри каждой из обеих крупных категорий почв зависит главным образом от общего количества присутсвующего в них органического вещества. Авторы рассчитали также и регрессию.

Обменный комплекс (Ca, Mg, K, Ca) указывает на очень слабый процент насыщения (S/T × 100 = V) у минеральных горизонтов гранити-

ческих почв (V = 5), слабый — у минеральных горизонтов сланцевых почв (V = от 10, до 20), и немного более повышенный — у тех-же горизонтов гидроморфных почв дна долины (V = 30-40).

Во всех геологических зонах почвы носят характер « *кислых буроземов* », или « *слабо выщелоченных буроземов* ».

Климат этих областей умеренный и влажный (800-1.200 мм годовых осадков, в зависимости от отдаленности от побережья, средняя годовая температура колеблется от 11° до 12°); на первый взгляд может показаться что климат этот благоприятствует выщелачиванию и подзолизации. Но на практике отмечается очень слабое выщелачивание глины и полное вымывание оснований, как о том свидетельствует величина V почв депрессий, и постоянная, но слабая подзолизация. Природный гумус, накопляющийся под дубовым и буковым лесным покровом, представляет морфологический характер « *промежуточного гумуса* » с сильно выраженной кислотностью (pH (H_2O) = 4; V = 5-12; C/N = 15-20), переходящего под пустошью в гумус более плотного типа — « *грубый гумус* ». По классификации принятой во Франции, почвы с лежащие на гранитических породах могут быть отнесены к классу VII — почв с грубым гумусом, и к группе « *бурых оподзоленных почв* », или так называемых « *подзолистых буроземов* ». Авторы рассматривают такие почвы как почвы переходного к подзолу типа, ибо, если и бывает возможно найти на самых обедненных основаниями гранитах северных склонов настоящие подзолистые почвы, то случается это очень редко.

На сланцевых породах эта « *бурая оподзоленная почва* » существует также, но ее эволюция не доходит до подзола, ибо как уже указано, процент ее насыщенности остается более высоким. На вершинах твердых пород эта почва принадлежит к классу II — почв с плохо дифференциированым профилем AC (недостаток кальция) и группе ранкеров выветривания : « *ранкеров с промежуточным или грубым гумусом* ».

Гидроморфные повы дна долины лежащие на граните составлены по большей части из « *олиготрофных торфяников с торфяным мхом* », кислотность которих колеблется от pH = 4,7 до 5,0; V = 20-25 и C/N = 15-20. На сланцах — это поверхностный псевдо-глей, содержащий гумус типа « *гидромулль* » и залегающий на горизонтах настоящего « *глея* », сформировавшегося благодаря глубокой но неравномерной гидромофии, ответственной за образование железои марганценосных конкреций отмечающих степень колебаний уровня грунтовых вод.

В одном и том-же климате (в данном случае атлантический климат), природа материнской породы и совместное влияние топографии являются главными факторами эволюции почв.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BÉTRÉMIEUX R., 1965. La représentation de la granulométrie des terres. Un procédé géométrique. *C. R. Acad. Agric.*, 347-351.

COPPENET M., Mme M. HELIAS, 1958. Les sols de la région de Gourin (Morbihan). *Ann. agron.*, **2**, 217-255.

DUCHAUFOUR Ph., 1965. *Précis de pédologie*, vol. 1, 481 p., 2e édition, Masson et Cie éd., Paris.

GUITIAN-OJEA F., COPPENET M., 1963. Étude des principaux types de sols de Bretagne. *Ann. agron.*, **14** (2), 195-218.

RAMPON A. Thèse de doctorat ès sciences (en préparation).

Ann. agron., 1967, **18** (5), 485-506.

EFFET DU MANQUE D'OXYGÈNE ET DE L'EXCÈS D'EAU AU NIVEAU DES RACINES SUR LA CROISSANCE ET LA NUTRITION GLOBALE DE LA PLANTE

Simone PÉRIGAUD

avec la collaboration technique de Lucette LE BLEVENEC et J.-M. SERVIER.

Station d'Agronomie
Centre de Recherches agronomiques du Massif central, 63 - Clermont-Ferrand
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Par une technique particulière de culture en solution, sous milieu gazeux contrôlé, l'auteur met en évidence l'effet très variable du manque d'oxygène au contact des racines sur la croissance globale du maïs et de la tomate. Sous excès d'eau, les dégâts subis par la plante antérieurement développée sur support poreux non saturé ne sont pas tous attribuables au manque d'oxygène et à la présence de produits réducteurs ; c'est le milieu aqueux par lui-même qui constitue un milieu défavorable à la racine.

INTRODUCTION

Nous avons mis en évidence (S. PÉRIGAUD, 1965 et 1966) qu'en conditions d'alimentation hydrique non limitantes et sans excès d'eau, la résistance mécanique qu'oppose le sol à la pénétration radiculaire a un effet dépressif sur la plante beaucoup plus marqué que l'absence d'oxygène dans le milieu de culture.

Sans mettre en doute le rôle de l'oxygène, élément majeur nécessaire à la respiration basale de la cellule et à l'absorption active des ions (RUSSEL, 1952), ces résultats suggèrent toutefois la nécessité de ramener le concept d'aération des racines à sa juste valeur.

Si les travaux sur racines excisées confirment les rapports entre taux d'oxygène et respiration (BERRY, 1949, VLAMIS-DAVIS, 1953), en précisent les relations avec la

température (BERRY-NORRIS, 1949) et montrent le parallélisme entre respiration et absorption (HOAGLAND-BROYER, 1936, cité par RUSSEL, 1961), les études sur plantes entières aboutissent à des contradictions nettes ; même avec des cultures sur milieu simple et bien défini, telle que la solution, l'optimum de croissance et d'absorption du végétal correspond à des taux d'oxygène très différents d'un auteur à l'autre. Pour certains, l'oxygène serait même parfaitement remplaçable par des ions métalliques (ARNON, 1937) ou par un niveau chimique beaucoup plus élevé (WOODFORD-GREGORY, 1948) ; à la limite la croissance deviendrait totalement indépendante du niveau oxygéné du milieu (GEISLER, 1964).

A l'examen, les conditions expérimentales dans lesquelles ces travaux ont été réalisés apparaissent plus ou moins bien précisées et très différentes entre elles. Or la croissance radiculaire est subordonnée à la synthèse et à la migration des glucides jusqu'à la racine (RUSSEL déjà cité) donc à la température, à la lumière, etc... La nature de ces relations n'est pas connue. Mais l'effet aération au niveau des racines sur la plante entière ne peut pas être dissocié des conditions d'environnement des parties aériennes (ARNON, déjà cité).

L'*ennoyage*, en limitant les transferts d'oxygène à sa dissolution dans l'eau au contact de l'atmosphère et à une simple diffusion en milieu liquide, est un cas particulier d'insuffisance d'oxygénation. Mais au manque d'oxygène s'ajoutent divers facteurs très défavorables pour la plante : accumulation de gaz carbonique, formation de corps réducteurs plus ou moins inhibiteurs de la respiration et du métabolisme (FULTON-ERICKSON, 1964), accessoirement disparition de l'azote minéral, etc... A la lumière d'observations diverses en plein champ, et de premiers essais de cultures sur solution, nous avons été en outre amené à penser que l'excès d'eau peut constituer indépendamment de ses conséquences secondaires un milieu physique défavorable à la racine *par lui-même*.

***

Sans chercher à aborder ici l'ensemble du problème de l'aération et de l'asphyxie des racines, nous avons conçu des essais tendant à répondre aux 3 questions suivantes :

1. la plante peut-elle ou non être privée d'un apport d'oxygène au niveau de ses racines ?

2. Une plante normalement développée sur support poreux sans excès d'eau est-elle affectée ou non, lors de son ennoyage, par le changement de milieu physique au contact de ses racines ?

3. Dans quelle mesure la réaction de la plante à de mauvaises conditions physiques au niveau de ses racines est-elle sous la dépendance de l'environnement des parties aériennes ?

Nous présenterons successivement l'étude des 2 facteurs : manque d'oxygène et excès d'eau, et traiterons de l'environnement à propos de chacun d'eux.

Précisons toutefois ici que cet aspect « conditions extérieures » n'a pas fait l'objet d'une étude systématique ; nous avons simplement répété et multiplié les mêmes essais sous des conditions extérieures différentes que nous nous sommes contenté d'enregistrer. Nous verrons dans quelle mesure ces résultats confirment ceux que nous avions précédemment obtenus (S. PÉRIGAUD déjà cité).

I. — EFFET DU MANQUE D'OXYGÈNE

A — *Dispositif expérimental*

a) *Milieu de culture.*

Dans nos précédents travaux, nous avions réalisé des cultures sur sol. Mais les interférences évidentes entre sa structure et sa compacité, la diffusion des gaz, et son activité biologique compliquent les dispositifs expérimentaux et limitent les possibilités d'interprétation. Nous avons été amené à utiliser ici des milieux de culture simples et mieux définis : la solution nutritive avec ou sans support solide poreux (sable).

Dans le premier cas, le système radiculaire baigne dans la solution (fig. 1) ; dans le second la solution nutritive est recyclée en circuit fermé sur le sable (fig. 2, voir légende).

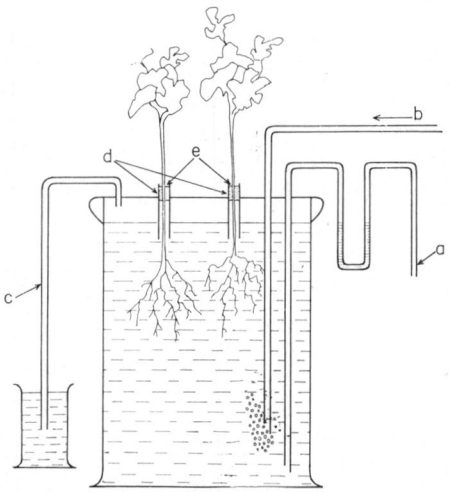


FIG. 1. — *Vase de culture en solution.*

a) Siphon (pour prélèvements ou changements de solution) formant joint hydraulique.
b) Entrée de gaz.
c) Sortie de gaz (sous joint hydraulique).
d) Tube souple contenant la tige de la plante et plongeant dans la solution (pour réduction des contacts possibles entre solution et atmosphère extérieure).
e) Joint souple.

b) *Traitements.*

Ils sont au nombre de deux :

— *sans oxygène* ; l'absence d'O_2 est obtenue par barbotage continu d'azote dans le milieu, isolé de l'atmosphère extérieure par un couvercle étanche jointoyé autour de la base des tiges (fig. 1 et 2).

— *avec taux d'oxygène en équilibre avec celui de l'atmosphère* ; obtenu sous le même montage par barbotage d'air privé de CO_2.

Dans les deux cas, le contrôle journalier de l'oxygène est effectué à la sonde polarographique BECKMAN (S. PÉRIGAUD, 1965) ; en milieu liquide (fig. 1) il est facile de maintenir l'absence totale d'oxygène dissous ; sur sable (fig. 2) les gaz de barbotage s'échappent aux défauts d'étanchéité s'opposant ainsi aux entrées d'air extérieur ; le taux d'oxygène gazeux varie dans ces conditions entre 0 et 3 p. 100.

c) *Solution nutritive ; son renouvellement.*

La solution nutritive est celle utilisée à Antibes (1). Elle contient 20 à 30 meq d'ions par litre dont 10 meq d'N minéral et les oligoéléments habituels. Elle est ajustée à pH 6,2-6,3.

Que cette solution soit en place (fig. 1) ou recyclée en circuit fermé (fig. 2), elle est contrôlée journellement et remplacée (sous atmosphère d'azote pour le traitement 0 p. 100 d'oxygène) toutes les fois que son pH varie de plus de 0,5 unité ou que le taux de nitrate descend en-dessous de 3 ou 4 mg par litre.

Le barbotage de gaz et le maintien du pH permettent d'avoir un taux de CO_2, libre et combiné, égal entre les traitements.

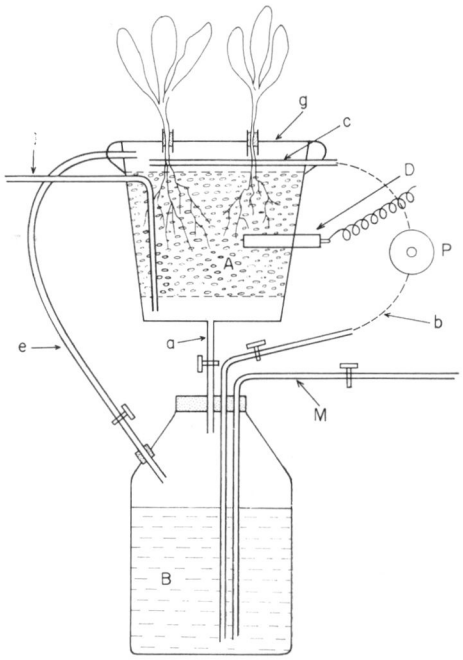


FIG. 2. — *Vase de culture sur sable avec recyclage des solutions (milieu ressuyé)*

P) Pompe, aspirant la solution en *b* et la refoulant vers la rampe d'arrosage *c* (déclanchée toutes les 20 minutes.)
a) Drainage (libre) de la solution vers la réserve B.
g) Couvercle étanche jointoyé autour des tiges des plantes.
e) Communication entre les deux chambres à gaz (pour mouvements de gaz provoqués par les mouvements de liquide) et trop-plein pour liquide en excès.
d) Alimentation en gaz sous débit contrôlé continu.
M) Point de prélèvement et renouvellement des solutions.
D) Point de contrôle du milieu gazeux (sonde Beckman).

d) *Plantes expérimentées et durée des traitements.*

Le *maïs INRA 260* a été utilisé aux mêmes stades que dans nos cultures sur sols :

— au stade 4e feuille pour les traitements de 5 à 8 jours,

— au stade 12e feuille, pour les traitements de 3 semaines dont la fin correspond à la sortie des épis mâles.

Toutes les plantes sont d'abord cultivées de façon identique puis regroupées en 4 blocs de vigueur homogène au départ du traitement. La matière sèche formée ensuite pendant la durée des traitements sert à apprécier leurs effets. Nous préciserons dans nos tableaux la signification de nos résultats.

Dans quelques cas particuliers, des essais ont été menés avec la *tomate* (variété *Marmande*).

(1) Mme BLANC, communication personnelle. Que Madame BLANC trouve ici l'expression de mes remerciements pour sa contribution à la conception de certains essais et la discussion de la présentation des résultats.

B — *Résultats*

1. — *Croissance.*

a) Comme dans nos cultures sur sols (S. PÉRIGAUD, déjà cité), la réaction du maïs au manque d'oxygène est dans l'ensemble positive (tabl. 1) : il n'est pas possible de nier l'utilité de cet élément. Mais son action n'est pas toujours très importante.

b) L'intensité de la réaction du végétal est étroitement subordonnée aux *conditions extérieures* (tabl. 1).

TABLEAU 1

Croissance journalière moyenne en g M. S. pendant la durée du traitement

Type d'essai	N°	Conditions d'environnement			Parties aériennes		Racines	
		insolation (h/j)	température moyenne (°C)	Piche (mm/j)	sous air	sous N_2	sous air	sous N_2
1. *Maïs 4e feuille*								
Milieu liquide	*a*)	7,60	21		0,380	0,138	0,124	0,032
Traitement 10 jours	*b*)	0,90	18	1,15	(0,114)	(0,118)	0,032	0,023
Sous serre	*c*)	7,60	26	2,1	0,122	0,87	0,064	0
2. *Maïs 8e feuille à épiaison mâle*								
Sable.	*a*)	10	19,7	6,2	4,01	2,98	0,98	0,70
Traitement 3 sem. sous abri ventilé	*b*)	9,60	20,9	4,3	2,86	2,46	0,63	0,54

Entre parenthèses ( ) = chiffres correspondant à des différences non significatives.

Ainsi, dans l'essai 1-*b*) le principal facteur limitant est l'insuffisance de lumière ; une mauvaise aération des racines devient sans conséquence. En 1-*a*) par contre, où les conditions de croissance sont voisines de l'optimum, les parties aériennes des plantes poussées sans oxygène sont réduites à 36 p. 100 de celles poussées sous air. D'autres essais dont nous ne donnons pas le détail ici révèlent que tous les intermédiaires sont possibles.

c) *Le stade végétatif* de la plante modifie non seulement l'intensité, mais aussi le sens de sa réaction.

— Sur jeunes plantules, le manque d'oxygène au niveau des racines affecte toujours plus leur croissance que celle des parties aériennes (tabl. 1) : sous conditions optima, le manque d'oxygène réduit de 64 p. 100 les parties aériennes et de 75 p. 100 les racines. Des températures excessives (essai 1-*c*) arrêtent même totalement la croissance du système radiculaire.

D'autre part, comme l'a déjà montré BRYANT (1934), les morphologies se différencient rapidement, les racines présentent des ramifications beaucoup plus nombreuses en milieu bien oxygéné que sous atmosphère d'azote.

— Avec des plantes plus développées, parties aériennes et racines sont également touchées par le manque d'oxygène. Sans doute ici nos milieux de culture ne sont-ils pas les mêmes pour les deux stades végétatifs étudiés, mais nos essais sur sols donnent les mêmes résultats. Il est d'ailleurs normal que le traitement affecte plus les racines d'une jeune plante que celles d'une plante plus âgée dont la croissance est déjà ralentie par la différenciation des organes reproducteurs (KRAMER, 1956 *a*).

d) *La tomate* réagit comme le maïs avec une sensibilité plus grande de ses racines ; dans un de nos essais, la partie aérienne n'a pas été touchée, attendu que le système radiculaire a été réduit de 54 p. 100. Dans des conditions extrêmes, cette croissance peut être totalement arrêtée.

2. — *Alimentation hydrique.*

L'absorption « active » de l'eau ne représentant qu'une faible part de l'absorption totale, le manque d'oxygène n'aurait donc que peu d'effet sur la consommation hydrique (CHANG LOOMIS, 1945 ; KRAMER, 1956 *b*).

Nos résultats montrent au contraire que la réaction de la plante est nette :

a) en l'absence d'oxygène au niveau des racines, la plante présente des signes de flétrissement en période de forte évapotranspiration, avec enroulement des feuilles puis sudation à leur extrémité. Le port est plus mou et au bout d'un certain temps le jaunissement des feuilles de la base apparaît.

b) parallèlement, *les teneurs en M. S.* des parties aériennes sont plus élevées :

— 89,6 p. 100 d'eau sous air,

— 86,8 p. 100 d'eau sous azote (différence hautement significative).

c) *la consommation en eau* est également plus faible ; la tomate réagit avec plus d'amplitude que le maïs, mais le sens de variation est le même. Ainsi la tomate, dans le cas de l'essai représenté ici (fig. 3) réduit son absorption de 27 p. 100 dans les 24 heures qui suivent le début du traitement ; l'écart s'accroît les jours suivants, mais la production de M. S. n'est pas diminuée dans les mêmes proportions que la consom-

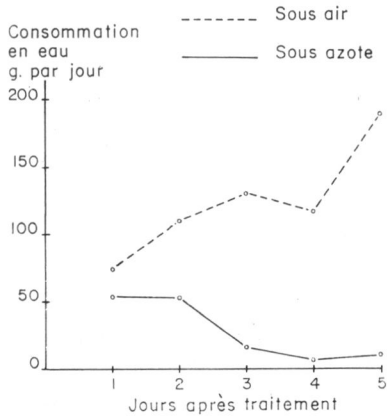


FIG. 3. — *Absorption de l'eau par la tomate*

mation en eau (tabl. 2) ; ces résultats confirment ceux de LETEY, LUNT, STOLZY, (1961). Rapidement la « productivité » de l'eau est accrue par le manque d'oxygène aux racines, mais au prix d'une baisse de production notable de la plante.

TABLEAU 2

Consommation en eau et production de M. S. (cultures en solution)

Plante	Traitement	Sour air	Sous azote
Tomate	Eau consommée (en 6 jours) (g) .	620	158
	M. S. totale produite (g).....	2,88	1,06
	g M. S./litre d'eau	4,65	6,7
Maïs (essai 1-*b*)	Eau consommée (en 6 jours) (g) .	64	53,5
	M. S. totale produite (g).....	1,17	1,13
	g M. S./litre d'eau	18,4	21,2

Différences hautement significatives à P = 1 p. 100.

3. — *Alimentation minérale.*

a) *Vitesse d'absorption des ions.*

L'analyse journalière des solutions nutritives permet de suivre la vitesse d'absorption des ions dans la mesure où le bilan comparé de l'appauvrissement des solutions successives correspond aux exportations par la matière sèche totale formée pendant le même temps. Dans nos conditions de travail, seuls le potassium et le phosphore n'ont pas subi de pertes.

Nous confirmons que l'absorption de ces deux ions est retardée par l'absence d'oxygène mais reste dans un rapport étroit et relativement élevé avec celle sous air (fig. 4).

b) *La composition minérale de la plante.*

En fin d'essai, elle n'est que le reflet de l'absorption pendant toute la vie de la plante, y compris la période qui précède le traitement.

Le manque d'oxygène agit sur la composition finale de la plante mais de façon différente selon les conditions d'environnement et l'âge de la plante (tabl. 3 et 4).

Dans l'ensemble, on assiste, au stade de jeune plantule, à une diminution des teneurs de la matière sèche en ions minéraux, surtout nette et toujours hautement significative pour le potassium. En fin de développement végétatif, le potassium tend à se concentrer dans les racines et c'est surtout le calcium qui diminue (tabl. 4).

c) *L'absorption minérale pendant la durée du traitement.*

C'est la différence entre les teneurs de la plante en fin et en début de traitement. Elle révèle des écarts significatifs entre les comportements des différents ions selon les conditions extérieures.

— En milieu bien oxygéné, l'absorption de P sous faible ensoleillement (essai 1-*b*) est moins ralentie que celle de N et K. Pour ces éléments, si la température est très élevée (essai 1-*c*), il n'y a même plus d'absorption mais excrétion (tabl. 5).

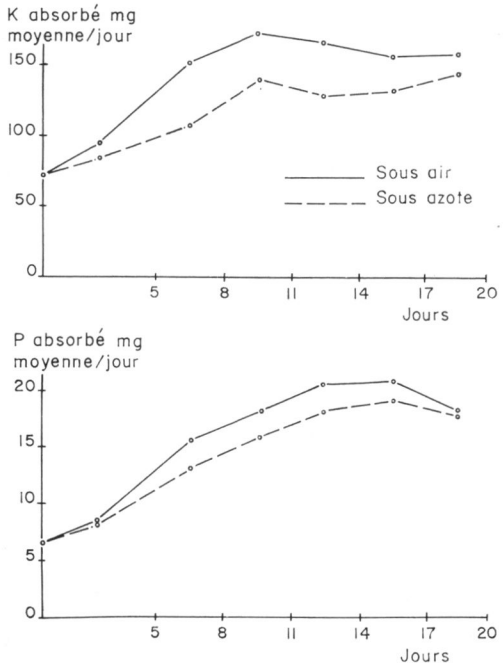


FIG. 4. — *Vitesse d'absorption du potassium et du phosphore*

TABLEAU 3

Composition minérale du maïs, stade 4e feuille après 8 jours de traitement

Essais nos	1-*a*		1-*b*		1-*c*	
	sous air	sous N_2	sous air	sous N_2	sous air	sous N_2
Azote (g %)						
Parties aériennes ...	3,66	2,31	3,10	2,43	(2,86)	(2,78)
Racines.....	3,33	2,90	(3,37)	(3,39)	(3,51)	(3,48)
Phosphore (g %)						
Parties aériennes ...	0,38	0,25	0,40	0,32	0,32	0,29
Racines.....	(0,50)	(0,58)	(0,68)	(0,63)	0,62	0,56
Potassium (g %)						
Parties aériennes ...	3,72	1,98	2,75	1,56	3,22	2,75
Racines.....	2,24	1,53	2,78	1,70	1,86	1,20
Calcium (g %)						
Parties aériennes ...	0,58	0,48	0,67	0,56	(0,76)	(0,70)
Racines.....					1,40	0,97

Les chiffres entre ( ) correspondent à des différences non significatives entre traitements.

TABLEAU 4

Composition minérale du maïs avant épiaison mâle après 3 semaines de traitement

Essais nos	2-*a*		2-*b*	
	sous air	sous N_2	sous air	sous N_2
Azote (g %)				
Parties aériennes	(2,60)	(2,66)	3,08	2,95
Racines.....	2,44	2,69	(2,23)	(2,26)
Phosphore (g %)				
Parties aériennes	0,39	0,43	(0,35)	(0,39)
Racines.....	0,29	0,36	(0,29)	(0,32)
Potassium (g %)				
Parties aériennes	3,52	3,69	3,0	3,15
Racines.....	1,67	2,27	1,54	1,93
Calcium (g %)				
Parties aériennes	0,59	0,51	0,65	0,54
Racines.....	1,17	0,82	2,0	1,72

Les chiffres entre ( ) correspondent à des différences non significatives entre traitements.

TABLEAU 5

Absorption relative des ions en milieu oxygéné en fonction des conditions extérieures (jeunes maïs)

Essais nos Conditions extérieures	1-*a* optimum	1-*b* peu ensoleillé	1-*c* très chaud
N.....	100	20,5	15,6
P	100	46	— 15
K.....	100	21,5	— 7

TABLEAU 6

Absorption journalière du maïs au stade 4e feuille sous air et sous azote (en indices)

Essais nos	1-*a*		1-*b*		1-*c*	
	sous air	sous N_2	+ air	+ N_2	+ air	+ N_2
Azote	100	20	100	62	100	6,5 *
Phosphore	100	16	100	72	32**	100
Potassium	100	16,5	100	15,3	19**	100

* Résultats douteux : nutrition azotée insuffisamment soutenue (dénitrification rapide).
** Excrétions.

— En l'absence d'oxygène, les absorptions de N et P sont infiniment moins réduites sous lumière insuffisante (essai 1-b) que par fort ensoleillement et température élevée ; par contre, celle du potassium reste fortement réduite dans tous les cas (de 80 à 85 p. 100 dans nos essais), et l'on peut même observer une forte excrétion (tabl. 6).

C — *Interprétation et conclusions*

1° *La présence d'oxygène au voisinage des racines est-elle indispensable ou non?*

Nos essais nous ont permis de confirmer que l'oxygène était nécessaire à une croissance normale de la plante. Son absence perturbe l'alimentation hydrique et minérale et modifie le rapport $\frac{\text{parties aériennes}}{\text{racines}}$.

Il est certain cependant que l'absence d'oxygène n'a pas un effet très marqué : même les plantes les plus sensibles, comme la tomate, non seulement ne meurent pas, mais continuent à croître et à se développer en l'absence totale d'oxygène pendant 10 jours et sous une oxygénation très faible (inférieure à 3 p. 100 O_2 en volume) de 3 semaines ; le maïs peut, dans certaines conditions, être à peine touché.

Sans doute l'alimentation à partir de solution nutritive est-elle plus facile que dans le sol et son niveau chimique élevé peut-il compenser l'insuffisance d'oxygénation (Woodford-Gregory, déjà cité). Nos propres résultats, obtenus à partir de cultures sur sols sont toutefois les mêmes (S. Périgaud, déjà cité) : le manque d'oxygène seul n'a jamais l'effet très dépressif auquel on pourrait s'attendre.

Cette efficacité limitée de l'oxygène ne peut s'expliquer que si la plante trouve cet oxygène ailleurs ;

— l'oxygène des nitrates peut, en principe, contribuer à cette alimentation (Gilbert Shive, 1945) ; mais le fait n'est pas bien confirmé et nous n'avons pas pu nous-même le mettre en évidence par des essais comparés, sous O_2 et sous N_2, de solutions nutritives plus ou moins nitriques.

— Le transfert d'oxygène des parties aériennes vers les racines à travers le phloème paraît avoir été bien mis en évidence (Jensen et col. 1964) et le rôle des feuilles dans l'alimentation en oxygène des racines a été confirmé (Soldatenkov-Cherkova, 1963). Il est vraisemblable que la sensibilité plus ou moins grande d'une plante au manque d'oxygène est liée à sa morphologie interne qui permet plus ou moins ces transferts.

Si cette hypothèse était définitivement confirmée, il deviendrait facilement explicable que seuls les travaux sur racines excisées aient pu démontrer le rôle de l'oxygène sans ambiguité. Sur plantes entières, les contradictions ne sont vraisemblablement pas toutes imputables à la faible diffusion de l'oxygène dissous et à l'insuffisance probable d'aération du milieu liquide le mieux oxygéné (Baver, 1956). Elles sont probablement dues plutôt aux rapports encore très mal connus qui existent entre la partie aérienne et le système radiculaire d'une même plante.

2° *Les conditions d'environnement modifient-elles la réaction de la plante au manque d'oxygène ?*

a) *Même en milieu bien oxygéné*, les conditions extérieures de température et de lumière affectent non seulement la croissance totale de la plante mais aussi le rapport entre ses parties aériennes et ses racines.

Quoique mal défini, la lumière joue un rôle prépondérant sur la croissance de la racine ; pour certains les sucres formés en moindre quantité sous faible éclairement sont utilisés préférentiellement sur place aux dépens des racines et le rapport Tige/Racine augmente (KRAMER, 1956 *a* ; TROUGHTON, 1961 ; NIELSEN-HUMPHRIES, 1966). Pour d'autres au contraire, une faible luminosité provoque le reflux des glucides au point d'entraîner parfois leur excrétion (NOSER, 1965).

Nos essais sur sols et solutions tendent tous à prouver que la plante ne réagit pas dans le même sens à une faible intensité lumineuse selon le stade de son développement ; la quantité de M. S. produite par gramme de racine est diminuée sous faible éclairement lorsque la plante est jeune et augmentée avant l'épiaison mâle (tabl. 7).

TABLEAU 7

Matière sèche produite par gramme de racine (sous milieu bien oxygéné)

Intensité lumineuse		Bonne	Faible	Signification de la différence
— *Maïs sur solutions*				
Stade végétatif	4e feuille.....	3,0	2,24	H. S.
	à épiaison mâle.	3,45	4,60	H. S.
— *Maïs sur sol* (réf. 1965 et 1966)				
Stade végétatif	4e et 5e feuille..	1,38	1,24	S.
	à épiaison mâle.	3,8	6,3	H. S.

H. S. = différence hautement significative P = 1 p. 100
S. = différence significative P = 5 p. 100

Ces résultats tendent à confirmer que les réserves hydrocarbonées dans les racines — dont leur croissance dépend — sont subordonnées non seulement à l'activité photosynthétique globale, mais aussi au niveau d'utilisation des sucres qu'accompagne toujours le potassium (NOSER, déjà cité).

b) *En l'absence d'oxygène*, nos résultats sont identiques dans nos cultures sur solution et sur sols :

— l'absence d'oxygène au niveau des racines est d'autant plus défavorable à la croissance aérienne que les conditions de la photosynthèse sont plus près de l'optimum ; plus la vitesse de croissance est faible en milieu aéré, moins est marqué l'effet dépressif du manque d'O_2 ;

— chez des plantes *jeunes*, la croissance des racines est relativement plus retardée que celle des parties aériennes par le manque d'oxygène et elles réagissent relativement plus aux variations de conditions extérieures.

L'interaction entre oxygène et conditions d'environnement n'a été étudiée, à notre connaissance, que pour le facteur température ; encore s'agit-il pour la plupart de travaux sur racines excisées. L'interférence entre la photosynthèse et l'absorption est certaine ; ce ne serait d'ailleurs pas entre Tige et Racine que la plante maintien-

drait un rapport constant, mais entre l'absorption d'azote et la synthèse des glucides (LUCKWILL, 1960) ; il est vraisemblable que l'oxygène agisse sur ce rapport.

En résumé et sur le plan pratique, il ressort de l'ensemble de nos résultats que :

1° l'examen d'un système radiculaire total *in situ*, s'il peut être un test des obstacles rencontrés ne permet pas d'apprécier la « vitalité » et la productivité d'une plante ;

2° que la bonne aération des racines est certes favorable à la plante mais ne constitue vraisemblablement *pas dans le sol* le facteur le plus limitant tout au moins sous l'aspect étroit « besoin des racines en oxygène ».

II. — EFFET D'UN EXCÈS D'EAU

A — *Méthodes expérimentales*

Les méthodes. Elles sont du même type que celles précisées précédemment, avec solution nutritive sur support inerte. Ici le sable lavé est stérilisé au départ de l'essai.

— *Les traitements* portent sur 2 facteurs à 2 niveaux : l'oxygène combiné avec la saturation en eau.

1. *L'oxygène* : il comprend, comme précédemment, les deux extrêmes :

a) teneur très faible, comprise entre 0 et 3 p. 100, entretenue par un barbotage continu d'azote « R » sous fermeture étanche au niveau des collets ;

b) taux de 21 p. 100, avec barbotage continu d'air privé de CO_2.

2. *Le milieu physique* :

a) milieu poreux, humide sans excès d'eau (fig. 2) ;

b) milieu ennoyé ; celui-ci correspond au maintien d'une nappe au niveau des collets (fig. 5).

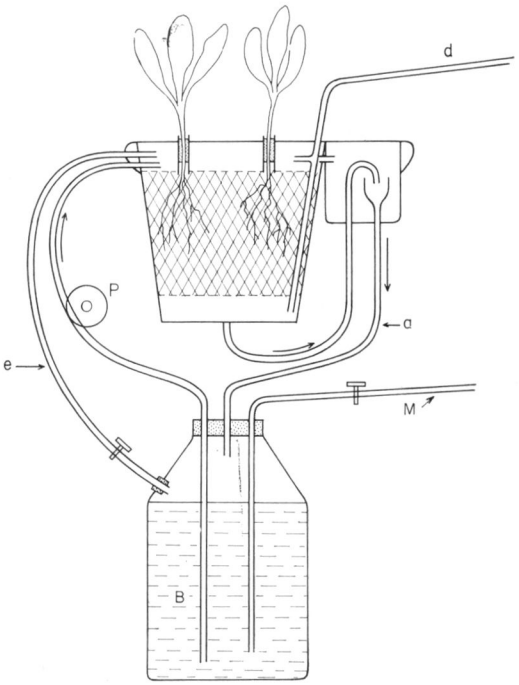


FIG. 5. — *Vase de culture sur sable sous ennoyage* (voir légende de la fig. 2)

— *Les solutions nutritives* contiennent 10 meq d'azote nitrique par litre et 5 d'N ammoniacal ; elles sont recyclées toutes les 20 minutes sous air ou sous azote, grâce aux dispositifs des figures 2 et 5. Comme précédemment leur pH est corrigé journellement et elles sont renouvelées toutes les fois que la variation de pH dépasse 0,5 unité ou que le taux de nitrate s'abaisse à 3-4 mg par litre. Autrement dit, sans avoir des compositions rigoureusement constantes, nos solutions restent comparables et d'une richesse chimique suffisamment élevée pour assurer une alimentation convenable sous tous les traitements. Bien que menées en conditions non stériles, la stérilité du support sableux au départ et le renouvellement des solutions ont permis le maintien d'un potentiel d'oxydo-réduction toujours supérieur à 300 mV. La présence constante de nitrate stabilise d'ailleurs ce potentiel à un niveau suffisamment élevé et empêche l'accumulation de produits de réduction (WEN LIN XUAN-PONNAMPERUMA, 1966).

Le dispositif de barbotage de gaz et le maintien du pH constant assurent entre les traitements des taux de CO_2 libre et combiné comparables. Les effets secondaires de l'excès d'eau sont donc éliminés.

— *La plante* expérimentée est, comme précédemment, le maïs INRA 260. La tomate (variété *Marmande*), connue par sa grande sensibilité au manque d'oxygène (AUBERTIN-KARDOS, 1965), sert de référence dans quelques essais. Le traitement est imposé à un stade où le système radiculaire est encore en plein développement, c'est-à-dire avant fin floraison (cité par KRAMER, 1956 *a*) ; pratiquement, il dure 20 jours et se termine à l'épiaison pour le maïs, à l'apparition des boutons floraux pour la tomate.

— *Les cultures* sont menées sous simple abri. Pour éviter les surchauffes excessives en été, la réserve de solution est maintenue dans un bac refroidi à l'eau de ville et les vases de cultures isolés par un matelas de laine de roche. Les conditions d'environnement sont enregistrées.

Comme précédemment tous les essais comportent 4 répétitions ; dans l'énoncé des résultats les différences significatives sont précisées.

B — *Résultats*

1° *Aspect, morphologie et croissance des plantes.*

— *Le manque d'oxygène en milieu poreux ressuyé* ralentit également la croissance des parties aériennes et des racines, cette réduction étant d'autant plus marquée que les conditions d'environnement sont plus favorables à la plante (tabl. 8).

— *Sous excès d'eau* la croissance de la plante est beaucoup plus ralentie, *que le milieu soit oxygéné ou non* (même tableau). Les parties aériennes tendent à jaunir, se fanent rapidement à la base et prennent un port de plante souffrant de la sécheresse. Les racines se différencient rapidement ; l'ennoyage les rend brunes, molles et très visqueuses. D'autre part on assiste, après quelques jours — aussi bien sur tomate que sur maïs — à une émission de racines nouvelles blanches et vigoureuses à la base de la tige, juste au-dessus de la nappe, *que l'atmosphère à cet endroit soit de l'air ou de l'azote.* Ces racines pénètrent à peine dans la solution mais semblent constituer la partie active du système radiculaire ; seules elles se laissent colorer, dans leur partie apicale, par le chlorure de tétrazolium, test de leur activité diastasique intense (TROUGHTON, 1957).

— *L'activité foliaire* exprimée par le rapport M. S. totale/surface de feuilles est, chez le maïs, plus réduite sous ennoyage que la surface de feuilles elle-même (tabl. 9). Ce résultat est en accord avec le port plus enroulé des feuilles.

— *La tomate* réagit dans le même sens que le maïs mais ses racines sont beaucoup plus sensibles (tabl. 10). Nous avons vu déjà précédemment qu'en cultures sur milieu liquide, la croissance des racines de la tomate pouvait être complètement arrêtée par l'absence d'oxygène. Le rapport parties aériennes sur racines se trouve donc considérablement augmenté chez cette plante.

TABLEAU 8

Effet comparé, sur maïs 8e feuille, du manque d'oxygène pendant 3 semaines en milieu ressuyé et sous excès d'eau

Essais	Environnement			Traitement	Parties aériennes (g M. S.)	Racines (g M. S.)	Total (indice)
	Insolation totale (heures)	Température (moyenne) (°C)	Évapo. Piche (mm/j)				
N° 1	163	19,7	6,2	*Milieu ressuyé*			
				Sous air.....	80,2	19,8	100
				Sous azote	59,8	14,0	74
				Excès d'eau			
				Sous air	32,0	6,7	39
				Sous azote	30	6,5	36
N° 2	123	20,9	4,3	*Milieu ressuyé*			
				Sous air	57,3	12,6	100
				Sous azote	49,4	10,8	86
				Excès d'eau			
				Sous azote	30,4	6,7	53

Les différences entre excès d'eau sous air et sous azote sont à la limite de la signification à la probabilité de 5 p. 100.

TABLEAU 9

Effet comparé de l'ennoyage et du manque d'oxygène sur la taille des plantes et l'activité foliaire (maïs)

		Hauteur des tiges (cm)	Surface des feuilles (en indices)	Rapport M. S. totale / Surface de feuille (en indices)
Ressuyé	sous air.....	72	100	100
	sous azote	63	90	88
Excès d'eau	sous air	55	83	66
	sous azote	52		

TABLEAU 10

Effet comparé du manque d'oxygène (pendant 10 jours) sur tomate avant floraison, en milieu ressuyé et sous excès d'eau

	Parties aériennes (g M. S.)	Racine (g M. S.)	Total (indice)	Tiges / Racines
Témoin sain oxygéné	8,19	3,24	100	2,52
Ressuyé sous N_2	7,39	1,49	77	4,95
Excès d'eau sous N_2	5,29	0,81	53	6,55

2° *Alimentation hydrique.*

— *La turgescence* des plantes sous excès d'eau est diminuée, leur teneur en matière sèche est plus élevée sous ennoyage qu'en milieu non saturé (85 p. 100 au lieu de 89 p. 100 d'eau).

— *L'absorption* d'eau est également très affectée :

a) *en début de traitement.*

Alors que les consommations en milieu non saturé, oxygéné ou non se différencient à peine, l'effet de l'ennoyage est très marqué (fig. 6) : en 48 heures il peut réduire l'absorption de l'eau par le maïs à 45 p. 100 de celle sous milieu sain

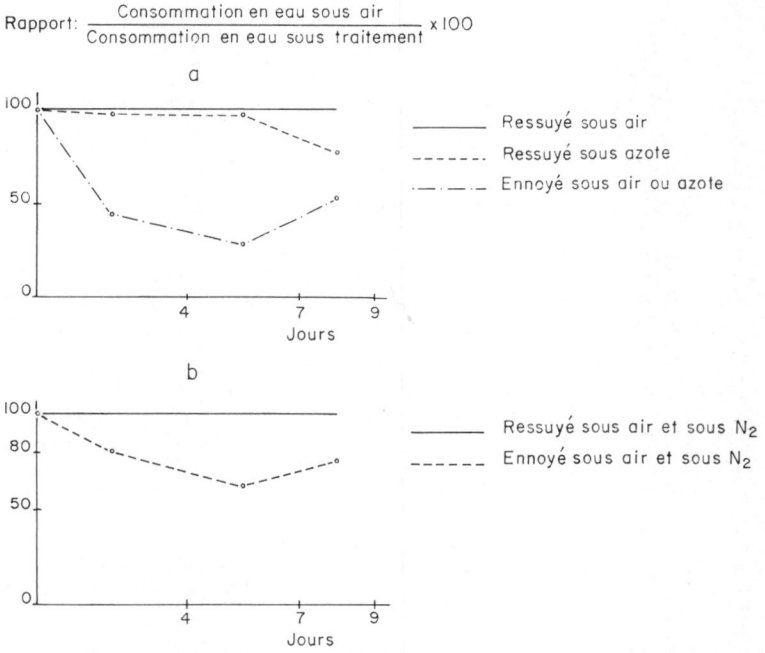


FIG. 6. — *Effets du manque d'oxygène et de l'ennoyage sur la consommation en eau du maïs*
a) Conditions extérieures favorables (essai 4)
b) Conditions extérieures défavorables (essai 5)

TABLEAU II

Consommation en eau dans les 4 derniers jours de traitement (maïs)

Milieu de culture	Ressuyé et oxygéné	Ennoyé sous azote
M. S. aérienne (g)	97,6	49,4
M. S. racines (g)	28	15,3
Surface folaire (indice)...	100	78
Consommation en eau (g)	1 550	561
(En indices).....	100	35,5

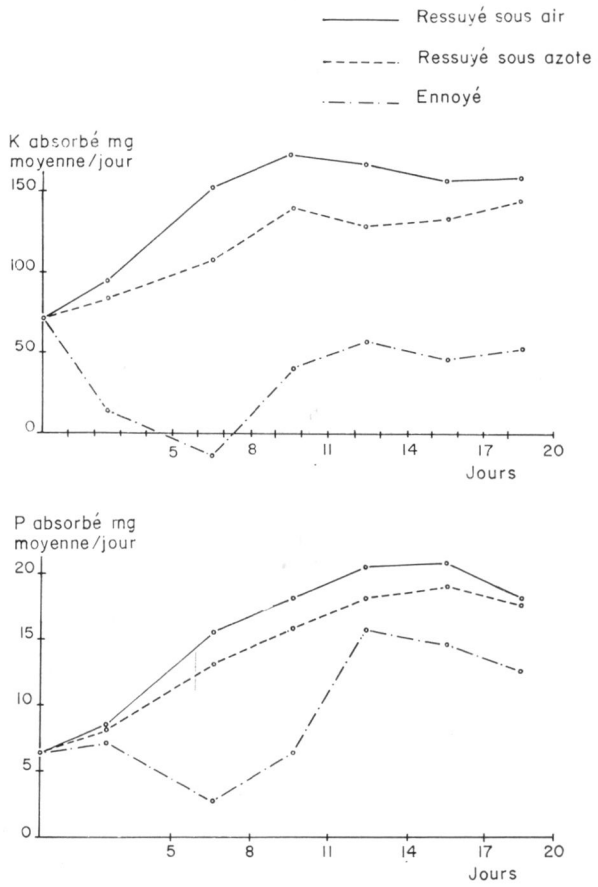


FIG. 7. — *Vitesse d'absorption du potassium et du phosphore par le maïs sur milieu sain et excès d'eau*

bien aéré, puis à 29 p. 100 le 4e jour. Ensuite la plante s'adapte partiellement et la réaction s'atténue (54 p. 100 le 8e jour, 64 p. 100 le 16e jour).

L'intensité du phénomène est fonction des conditions extérieures mais son sens reste le même (même fig.). Le comportement de la tomate est identique, avec une réaction encore plus grande à l'excès d'eau.

b) *en fin de traitement.*

Le maïs, ennoyé depuis 16 jours réduit sa consommation en eau de 64 p. 100 par rapport au témoin ; la matière sèche aérienne n'est à ce moment diminuée que de 50 p. 100 et la surface foliaire de 22 p. 100 seulement (tabl. 11).

La réduction de consommation en eau est donc plus en rapport avec celle du développement racinaire qu'avec celle des feuilles, ce qui confirme bien un effet racine déjà signalé par LETEY (déjà cité).

3° *Alimentation minérale.*

a) *La vitesse d'absorption des ions.*

L'absence d'oxygène seule ralentit l'absorption mais celle-ci reste dans un rapport étroit et élevé avec celle en milieu bien oxygéné. L'ennoyage par contre réduit rapidement et considérablement l'absorption du *potassium* qui peut même être désorbé. L'acide phosphorique suit une évolution identique, mais la réaction est moins immédiate et moins forte (fig. 7).

b) *La composition minérale de la plante* est dans l'ensemble affectée par l'ennoyage dans le même sens que par le seul manque d'oxygène mais avec beaucoup plus d'intensité. Chez le maïs le taux de potassium est plus diminué dans la partie aérienne mais n'est pas concentré dans les racines (tabl. 12). Les alcalino-terreux sont considérablement réduits (de l'ordre de 80 p. 100).

c) *Les exportations de minéraux* pendant la durée du traitement sont finalement beaucoup plus diminuées par l'ennoyage que par le seul manque d'oxygène, mais de façon très variable selon les ions (tabl. 13).

Les exportations dépendent des conditions d'environnement mais à ce stade de développement on retrouve toujours avec le maïs que le calcium et le magnésium ne sont que très faiblement absorbés sous ennoyage malgré la disponibilité de ces ions dans les solutions utilisées.

C — *Interprétation et conclusions*

1° *L'action de l'oxygène.*

Nous avons montré précédemment et confirmé ici que l'absence d'oxygène dans le milieu de culture liquide — ou poreux non saturé — entrave plus ou moins la croissance de la plante.

Dans un milieu poreux saturé d'eau la présence d'oxygène n'empêche pas la croissance de la plante d'être beaucoup plus fortement réduite que par son absence dans le milieu ressuyé.

Pratiquement, sous ennoyage, l'effet dépressif est le même, qu'il y ait ou non oxygène au contact des racines. Dans nos conditions expérimentales *il apparaît donc difficile d'attribuer au manque d'oxygène les dégâts provoqués sur une plante par l'ennoyage de son système radiculaire.*

TABLEAU 12

Composition minérale du Maïs g p. 100 M. S.

Essais	N° 1 (1)			N° 2 (1)		
	Ressuyé		Ennoyé	Ressuyé		Ennoyé
	oxygéné	sous azote	sous azote	oxygéné	sous azote	sous azote
Azote						
Parties aériennes ...	2,60	(2,66)	2,31	3,08	(2,95)	2,28
Racines.....	2,44	(2,69)	2,62	2,23	(2,26)	(2,17)
Phosphore						
Parties aériennes ...	0,39	0,43	0,42	0,35	0,39	(0,35)
Racines.....	0,29	0,36	0,36	0,29	0,32	0,40
Potassium						
Parties aériennes ...	3,42	(3,69)	2,75	3,0	3,15	2,4
Racines.....	1,67	2,27	1,60	1,54	1,93	(1,52)
Calcium						
Parties aériennes ...	0,59	0,51	0,51	0,65	0,54	0,45
Racines.....	1,17	0,82	0,31	2,0	1,72	0,90
Magnésium						
Parties aériennes ...	0,25	0,20	0,16	0,27	0,18	0,08
Racines.....	0,48	0,38	0,11	0,27	(0,28)	0,05

Entre parenthèses ( ) = chiffres dont la différence par rapport au témoin (1re colonne) n'est pas significative
(1) Se référer au tableau 1.

TABLEAU 13

Absorption des ions minéraux par le maïs en 20 jours de traitement

	Milieu sain oxygéné		Milieu sain sous azote		Milieu ennoyé sous azote	
	(g %)	(indices)	(g %)	(indices)	(g %)	(indices)
Azote	2,44	100	1,87	77	0,78	32
Phosphore	0,33	—	0,27	82	0,12	36
Potassium	3,13	—	2,61	83	1,72	27
Calcium	0,65	—	0,32	49	0,04	6
Magnésium.....	0,37	—	0,23	59	0,08	14

Précisons bien toutefois que, *in situ*, un effet de la disparition de l'oxygène n'est pas totalement exclu ; il est certain qu'un milieu non stérile peut devenir, au contact des racines, le siège d'une vie microbienne intense alimentée par les exsudats radiculaires eux-mêmes : un essai annexe nous a mis en évidence qu'une solution nutritive peut subir une dénitrification intense mais que son évolution est considérablement ralentie dès que l'on remplace la racine vivante par une racine morte. Dans le sol, ce n'est pas la racine seule qui est à envisager : les transferts de gaz, internes à la plante, peuvent être, s'ils existent, suffisants pour l'alimentation oxygénée des racines elles-mêmes, mais insuffisants pour l'ensemble de la rhizosphère.

2° *L'action de l'eau.*

Développée sur support poreux puis soumise brutalement à un ennoyage, une plante marque un ralentissement net dans ses fonctions d'absorption. Ensuite, elle s'adapte partiellement en émettant en surface des racines nouvelles qui paraissent être les seules vraiment actives. Cette émission de racines adventices ne correspond pas à une « recherche » de l'oxygène en surface de la nappe, mais à une simple corrélation de croissance classique : lorsqu'une racine est lésée, quel qu'en soit la cause, une autre prend naissance au-dessus de l'ancienne.

Nous avons vérifié — par un essai complémentaire — que ces lésions n'avaient pas une origine mécanique due à un renouvellement trop brutal de notre solution.

Dans notre dispositif, il n'y a ni accumulation de CO_2, ni formation de produits de réduction ; *la différence de comportement de la plante dans les deux milieux, aéré et ennoyé, est due ici au seul effet eau.*

Une plante peut très bien se développer sur un milieu liquide, mais la morphologie de son système radiculaire est alors très différente de la normale. D'autre part, si l'on transplante un végétal d'un milieu poreux, sol ou sable, sur une solution, il réémet aussi de nouvelles radicelles à la base de la tige juste au-dessus du liquide. Si l'on élève le niveau de la solution, des racines se reforment encore plus haut et ceci que l'atmosphère saturée en vapeur d'eau *soit oxygénée ou non*. Si l'on détruit ces fines repousses, la plante finit par périr.

Autrement dit, bien que sur solution la réaction du végétal soit moins importante que dans le cas d'ennoyage, une « adaptation » du système radiculaire reste obligatoire et comprend le développement de racines *en dehors du milieu aqueux proprement dit*. Nos essais ne nous permettent pas de leur attribuer un rôle direct dans la fourniture d'oxygène à l'ensemble du système radiculaire. Les mécanismes mis en jeu restent à préciser.

Reçu pour publication en août 1967.

SUMMARY

EFFECTS OF OXYGEN DEFICIENCY AND WATER EXCESS ON THE GROWTH AND MINERAL NUTRITION OF PLANTS

The special technique described herein applies to cultivating plants in a solution under a controlled gaseous atmosphere, the object being to investigate the part played by oxygen and excess of water in contact with the roots.

I. *Oxygen.* — Efficient oxygenation of the roots of maize and tomatoes depends on the environmental conditions of the above-ground portion of the plant. This may well be but a minor limiting

factor. These results explain the many inconsistencies found in the relevant literature. Various assumptions are set forth and discussed.

II. *Water Excess.* — This distinctly slows down the growth of the plant, concomitantly with a marked decrease of water and potassium consumption. The damage sustained by the root system is not entirely ascribable to the lack of oxygen, nor even to the presence of reducing substances, the aqueous medium being itself detrimental to the survival of the root previously grown on a porous medium. A subsequent accommodation of the plant requires that the plant sprout new roots just above the water level, whether the atmosphere is oxygenated or not. The process involved needs going into.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG DES SAUERSTOFFMANGELS UND DES FEUCHTIGKEITSÜBERSCHUSSES AUF DAS WACHSTUM UND DIE MINERALISCHE ERNÄHRUNG DER PFLANZE

Die Verfasserin wendet eine besondere Nährlösungsanbautechnik unter kontrolliertem Gas an, um die Rolle des Sauerstoffes bei der Berührung mit den Wurzeln, unter besonderer Berücksichtigung des Feuchtigkeitsübers chusses, zu untersuchen.

I. *Sauerstoff.* — Die Oxydierung der Wurzeln übt auf das Wachstum von Mais und der Tomatenpflanze, je nach den Umgebungsbedingungen des Luftteiles dieser Pflanzen, eine verschiedene Wirkung aus. Sie kann in bestimmten Fällen nur als limitativer Faktor auftreten. Diese Ergebnisse erklären die zahlreichen Widersprüche in den diesen Forschungen gewidmeten Arbeiten. Verschiedene Hypothesen werden vorgeschlagen und diskutiert.

II. *Feuchtigkeitsüberschuss.* — Der Feuchtigkeitsüberschuss hat ein eindentiges Nachlassen des Pflanzenwachstums mit relativ bedeutender Herabsetzung des Wasser- und Kalium-verbrauches zur Folge. Die am Wurzelsystem erlittenen Schäden sind nicht alle dem Mangel an Sauerstoff, und auch nicht der Anwesenheit von reduzierenden Stoffen zuzuschreiben. Das wasserhaltige Milieu selbst stellt bereits ein ungünstiges Milieu für das Fortleben der vorher auf porösem Milieu entwickelten Wurzel dar. Damit eine spätere Anpassung möglich sei, muss die Pflanze imstande sein, neue Wurzeln gerade an der Oberfläche des Grundwasserspiegels zu erzeugen, und dies unabhängig von einer oxydierten oder nicht oxydierten Atmosphäre. Die dabei eingesetzten Mechanismen bleiben zu präzisieren.

РЕЗЮМЕ

Эффект недостатка кислорода и избыточной влажности на рост и минеральное питание растений

С. ПЕРИГО.

Для изучения роли кислорода, при его соприкосновении с корнями и, в особенности, — роли избыточной влажности, автор применил особые технические приемы возделывания растений на питательных смесях в контролируемой газовой среде.

I. *Кислород.* — Аэрация корней при помощи кислорода производит разное действие на рост кукурузы и томатов, в зависимости от условий окружающих воздушную часть и, в некоторых случаях, может играть роль только второстепенного, ограничивающего фактора. В свете этих данных становятся понятными причины получения противуположных результатов, в работах посвященных этому вопросу. Автор предлагает и подвергает обсуждению различные гипотезы.

II. *Избыточная влажность.* — Избыток влаги заметно тормозит рост растений и сопровождается относительно сильным уменьшением потре-

бленных количеств влаги и калия. Но не все повреждения корневой системы вызываются недостатком кислорода, ни даже присутствием в среде продуктов-восстановителей; водная среда сама по себе создает неблагоприятную обстановку для выживания корней, развивавшихся до этого в пористой среде. Позже, чтобы приспособиться, растение должно иметь возможность пустить новые корни, пролегающие по поверхности водного пласта, вне зависимости от степени обогащения атмосферы кислородом. Необходимо более точно выяснить механизмы приводящиеся в действие всеми этими явлениями.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNON D. I., 1937. Ammonium and nitrate nitrogen nutrition of barley at different seasons in relation to hydrogen ion concentration, manganese, copper and oxygen supply. *Soil Sci.*, 91-113.

AUBERTIN G. M., KARDOS L. T., 1965. Root growth porous media under controlled conditions. II. Effect of aeration levels and rigidity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 363-365.

BAVER L. D., 1956. *Soil Physics*, 489 p., 3e éd. ; John Wiley Sons Inc. New-York.

BERRY L. J., 1949. The influence of oxygen tension on the respiration rate in different segments of onion roots. *J. Cell. Comp. Physiol.*, 33-41.

BERRY L. J., NORRIS W. E., 1949. Studies on onion root respiration. I. Velocity of oxygen consumption in different segments of root at different temperatures as a function of partial pressure of oxygen. *Biochim. biophys. Acta*, **3**.

BRYANT A., 1934. Comparison of anatomical and histological differences between roots of barley grown in aerated and non aerated culture solutions. *Plant Physiol.*, **9**, 389-391.

CHANG LOOMIS, 1945. Effect of carbon dioxide on absorption of water and nutrients by roots. *Plant Physiol.*, **20**, 221-232.

FULTON J. M., ERICKSON A. E., TOLBERT N. E., 1964. Distribution of C^{14} among metabolites of flooded and aerobically grown tomato plants. *Agric. J.*, **56**, 527-729.

GEISLER G., 1964. Investigation on the effects of soil atmosphere on root growth. *Z. Acker-u. Pflanzenbau.*, 118-399 (traduction).

GILBERT S. G., SHIVE J. W., 1945. The importance of oxygen in the nutrient substrate for plants. Relation of the nitrate ion to respiration. *Soil Sci.*, **59**, 453-460.

JENSEN C. R., LETEY J., STOLZY L. H., 1964. Labeled oxygen-transport through growing corn roots. *Science*, **1**, 144, 550-552.

KRAMER P. J., 1956. *Encyclop. Plant Physiol.*, vol. III, éd. Springer-Verlag.
a) Roots as absorbing organs, p. 188-209.
b) Physical and physiological aspects of water absorption, p. 124-159.

LETEY J., LUNT O. R., STOLZY L. H., 1961. Plant growth, water use and nutritional response to rhizosphere differentials of oxygen concentrations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**. 183-186.

LUCKWILL L. C., 1959-60. The physiological relationships of root and shoot. *Soc. Hortic.*, **14**, 22-26.

NIELSEN K. F., HUMPHRIES E. C., 1966. Effects of root temperature on plant growth. *Soils Fertil.*, **29** (1), 1-7.

NOSER M., 1966. Influence de la température, de l'ombrage et du pH d'une solution nutritive sur l'absorption des éléments de la nutrition minérale, la teneur en sucres et en acides aminés libres chez le maïs et le pois. *Izv. Timiryaz. Sel's Kobb Akad.*, **1**, 59-70 (traduction CNRA).

Mme PÉRIGAUD S., 1965. Effets de la résistance mécanique et du déficit en oxygène sur le développement radiculaire. *C. R. Acad. Agric.*, 1209-1220.

Mme PÉRIGAUD S., 1966. Effets de la résistance mécanique et du déficit en oxygène :
I. — sur la croissance du maïs :
II. — sur la nutrition minérale du maïs. *C. R. Acad. Agric.*,**10**, 695-707.

RUSSEL E. W., 1961. *Soil conditions and plant growth*, 688 p., 9e éd. Jarrold and Sons Ltd. Norwick.

RUSSEL M. B., 1952. *Soil aeration and plant growth* ds Soil Physical conditions and plant growth, 491 p., vol. 2, Byron T. Shaw éd.

SOLDATENKOV S. V., CHERKOVA T. V., 1963. The role of leaves in the respiration of oxygen-deprived roots. *Trans. Fiz. Rast.*, **10** (5), 535-543.

TROUGHTON A., 1957. The underground organs of herbage grasses. *Commonwealth Agric. Bureau*, **44**, 157 p.

Ann. agron., 1967, **18** (5), 507-528.

EXTRACTION DE PETITS ÉCHANTILLONS DE GAZ DU SOL. DOSAGE PAR CHROMATOGRAPHIE

M. VILAIN et J.-P. DRUELLE

Station agronomique, 62 - Arras
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Une technique de prélèvement et de détermination des gaz est décrite.
Les volumes prélevés sont égaux ou inférieurs à 1 ml.
Les aspects suivants d'utilisation ont été étudiés successivement :
— technique et étalonnage de la méthode chromatographique de dosage des gaz,
— mise au point d'un dispositif d'extraction des gaz du sol pour effectuer des petits prélèvements,
— utilisation pour suivre l'évolution de l'atmosphère du sol en fonction des facteurs extérieurs,
— commentaire des observations.

INTRODUCTION

Le sol est un milieu hétérogène : la composition de son atmosphère peut présenter localement des variations. Cette remarque est en accord avec les travaux de HACK (1956) qui en étudiant l'influence du volume de prélèvement, constate une grande variabilité dans la composition de l'atmosphère. De même BLACK (1957) émet l'hypothèse d'une hétérogénéité de composition au voisinage agrégat-racine.

Les techniques de détermination des gaz du sol employées jusqu'alors ne permettent pas d'aborder le problème à ce niveau.

En effet, les premiers chercheurs (RUSSEL, APPLEYARD, 1915) opéraient des prélèvements de volumes importants (100 à 150 ml). L'extraction d'un tel échantillon provoque une perturbation et un mélange des gaz du sol. Dans de telles conditions le prélèvement ne peut caractériser ni un niveau, ni une zone restreinte, il n'est que le reflet de l'atmosphère baignant un volume de sol très important et mal délimité.

Aussi avons-nous cherché à mettre au point une nouvelle technique d'extraction, l'échantillon étant dosé ensuite par chromatographie en phase gazeuse.

Nous avons tenté de localiser au mieux notre prélèvement et de réduire les perturbations provoquées par l'extraction de celui-ci autant qu'il était possible.

L'utilisation de la chromatographie en phase gazeuse présente l'avantage d'éviter les manipulations excessives de gaz et permet une détermination avec une précision satisfaisante.

Nous avons tenté de voir si les résultats obtenus reflètent une hétérogénéité locale, ce qui confirmerait les idées de BLACK ou si par un recoupement de plusieurs déterminations faites en des points différents d'un même niveau de sol on pouvait utiliser la technique pour caractériser l'atmosphère d'un niveau tout entier.

Ceci nous a conduit à multiplier les sites d'extraction et à amorcer des comparaisons avec d'autres techniques de prélèvement.

I. — LA TECHNIQUE DE CHROMATOGRAPHIE EN PHASE GAZEUSE

1. *Rappel du principe de la technique chromatographique*

Sous le nom de chromatographie on désigne un ensemble de techniques de séparation dans lesquelles on utilise une migration différentielle ; une phase stationnaire est en équilibre avec une phase mobile.

En chromatographie en phase gazeuse (ou d'adsorption), le gaz vecteur qui transporte le « soluté » le long de la colonne constitue la phase mobile ; l'adsorbant solide, finement divisé, qui remplit cette colonne, la phase stationnaire.

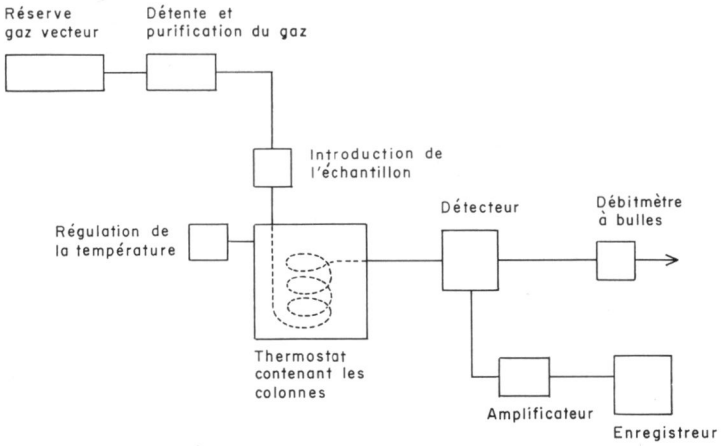


FIG. 1. — *Schéma du chromatographe Fischer*

Les molécules des gaz composants ont des interactions différentes avec la phase solide. On observe une migration différentielle, chaque composant gazeux est caractérisé par un coefficient de partage (notion analogue de celle de Rf en chromatographie sur papier), une vitesse de passage et un temps de rétention dans la colonne chromatographique. Il faut noter, cependant, que ces caractéristiques sont influencées par la température de l'analyseur.

Ainsi, par un choix judicieux des dimensions de la colonne et du matériau de remplissage, il est possible de séparer les différentes molécules constituant un mélange gazeux.

L'appareil utilisé est un chromatographe Fischer 25 M du type classique (fig. 1). Il comprend deux colonnes de 76 cm et 198 cm respectivement remplies d'hexaméthylphosphore amide H. M. P. A. (60-80 mesh) et de tamis moléculaire 13 X (46-60 mesh).

La détection se fait par variation de conductibilité thermique. Un courant d'intensité constante (5 ou 7 mA) parcourt une thermistance placée dans le flux du gaz vecteur (hélium). Il s'établit un équilibre et l'élément sensible est porté à une certaine température. L'hélium ayant une conductibilité thermique différente de celle des autres gaz, l'arrivée d'un mélange gazeux provoque une rupture d'équilibre. La température de la thermistance et sa résistance électrique varient.

Ces variations sont enregistrées en insérant l'élément sensible dans une branche d'un pont Wheatstone. Un autre élément, identique au premier se trouve dans l'autre branche du pont et baigne dans le gaz vecteur pur.

La tension résultant du déséquilibre est amplifiée, transmise à un potentiomètre enregistreur ; elle se manifeste sous forme d'un pic. Le temps de rétention, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre l'injection de l'échantillon et la sortie du pic correspondant, est spécifique du gaz.

Un mélange gazeux, injecté dans la chambre chromatographique, traverse rapidement la colonne 1 qui ralentit le gaz carbonique lequel se trouve ainsi séparé des autres composants. Le détecteur 1, qui se trouve sur le trajet normal, à la sortie de la colonne remplie de H. M. P. A. (fig. 1 *bis*) donne un pic « composite » suivi immédiatement par celui du gaz carbonique.

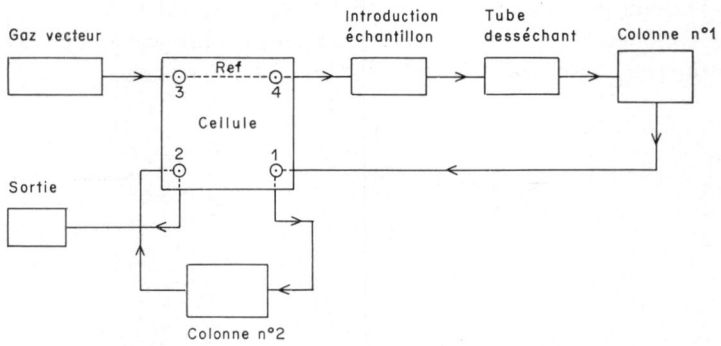


FIG. 1 *bis*. — *Schéma de l'analyseur et détecteur*

La colonne 2 absorbe définitivement le gaz carbonique, et sépare les autres gaz. Le détecteur 2 donne autant de pics qu'il y a de composants gazeux.

Ce dispositif permet d'analyser simultanément les gaz suivants :

gaz carbonique
oxygène
azote
méthane
hydrogène sulfuré

Le chromatogramme obtenu (fig. 2) permet de mettre en évidence chaque constituant d'un mélange gazeux. L'analyse quantitative nécessite un étalonnage.

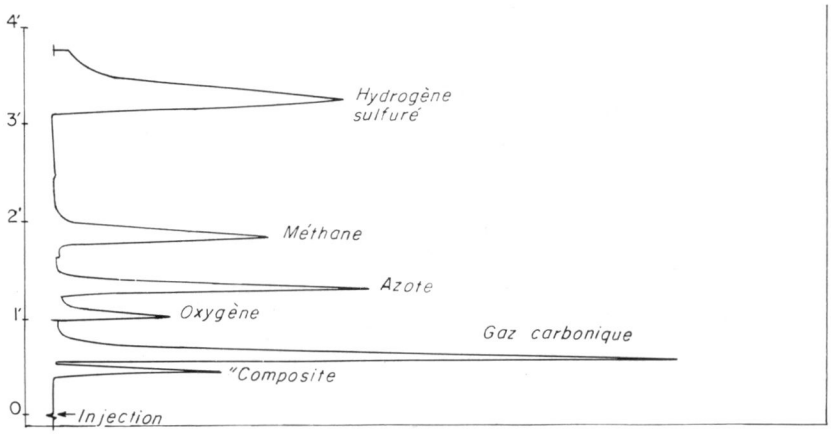


FIG. 2. — *Exemple de chromatogramme*

2. *Étalonnage de l'appareil*

On utilise deux méthodes pour étalonner le chromatographe :

— un étalonnage direct au moyen d'un mélange synthétique de teneur connue : (CO_2 = 1,8 p. 100 ; O_2 = 10 p. 100 ; N_2 = 88 p. 100)

— un étalonnage par comparaison avec les indications fournies par une sonde à oxygène Beckmann dans une enceinte fermée, maintenue à pression constante (fig. 3). Ce procédé n'est utilisable que pour le mélange oxygène-azote.

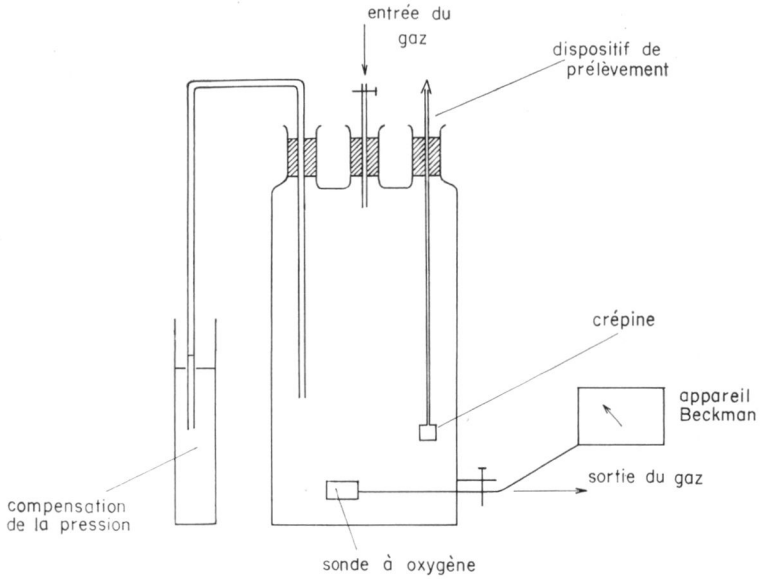


FIG. 3. — *Dispositif d'étalonnage par comparaison*

Les prélèvements gazeux sont effectués à l'aide d'une seringue hypodermique de 1 ml et directement injectés dans la chambre chromatographique.

L'aire délimitée par le pic varie linéairement avec la concentration de gaz correspondant. Pour l'oxygène et le gaz carbonique, on constate que la proportionnalité reste valable si l'on substitue la mesure de la hauteur de pic à celle de la surface, ce qui revient à assimiler cette aire à celle d'un triangle isocèle.

Les courbes d'étalonnage sont donc obtenues en injectant les gaz à des pressions partielles différentes et en mesurant les hauteurs de pic correspondantes (fig. 4 et 5).

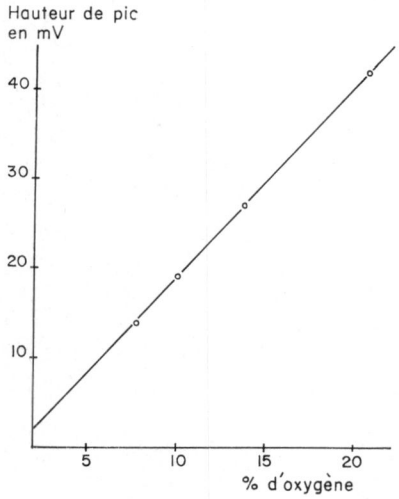


FIG. 4. — *Courbe d'étalonnage pour l'oxygène* (760 *mm Hg* ; 20°*C*)

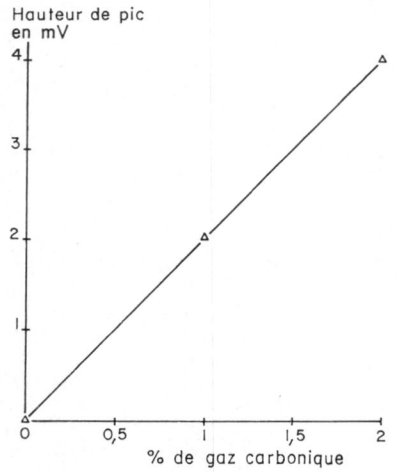


FIG. 5. — *Courbe d'étalonnage pour le gaz carbonique* (760 *mm Hg* ; 20°*C*)

Le pic caractéristique de l'azote présente une traînée importante du fait de la teneur élevée de ce gaz dans l'air. Il y a surcharge de la colonne. Il faut donc mesurer l'aire délimitée par le pic, l'emploi d'un intégrateur devient nécessaire. La courbe d'étalonnage de l'azote établie comme il est indiqué précédemment n'est pas rigoureuse (fig. 6). Cependant on peut procéder à une mesure relative en prenant soin d'opérer sur un volume d'échantillon identique à celui que l'on a injecté lors de l'étalonnage. En se limitant aux concentrations de 60 p. 100 à 100 p. 100, il est possible de doser ce gaz avec une précision acceptable (fig. 6 *bis*).

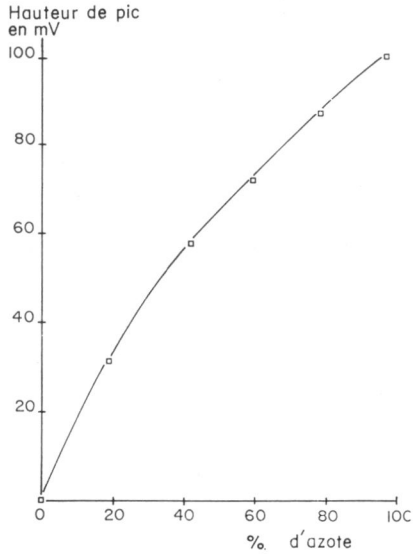


FIG. 6. — *Courbe d'étalonnage pour l'azote* — 0-100 *p.* 100 — (760 *mm Hg* ; 20°*C*)

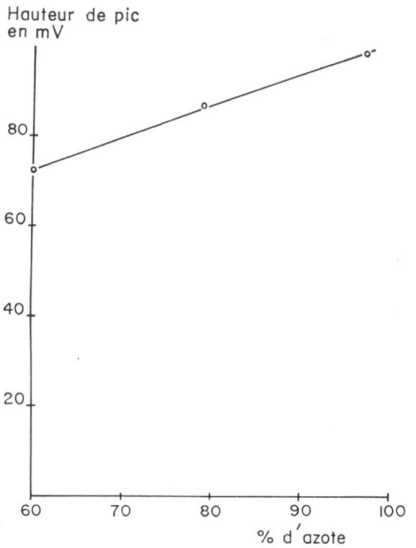


FIG. 6 *bis*. — *Courbe d'étalonnage pour l'azote* — 60-100 *p.* 100 — (760 *mm Hg* ; 20°*C*)

Les conditions d'étalonnage doivent être très strictes pour une bonne reproductibilité de la méthode. Il faut maintenir rigoureusement constant le débit du gaz vecteur, la température des colonnes et de l'appareil de détection. On tient compte des conditions expérimentales (pression, température, tension de vapeur d'eau) qui peuvent influer sur le volume réel de gaz introduit. Une table de correction est réalisée à cet effet.

L'argon n'est pas différencié de l'oxygène (0,9 p. 100 dans l'air). Toutes ces précautions étant respectées, on peut prétendre obtenir une précision de l'ordre de 0,5 à 1 p. 100 pour oxygène et gaz carbonique, et 2 p. 100 pour l'azote avec une prise d'échantillon de 1 ml.

3. *Exemple de détermination*

Considèrons le chromatogramme de la figure 7 (1er échantillon) :

Gaz carbonique	1,2 mV ± 0,01
Oxygène	39,4 mV ± 0,2
Azote	81,6 mV ± 0,4

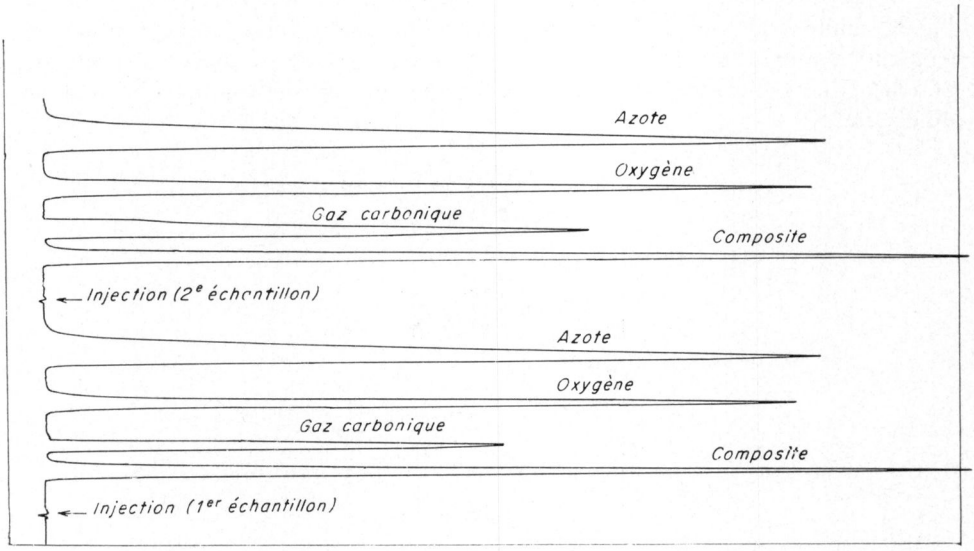


FIG. 7. — *Chromatogramme d'un échantillon gazeux extrait du sol*

Colonnes { H. M. P. A. 76 cm
Tamis moléculaire **13 X** 198 cm

1 ml de gaz extrait du sol
1er échantillon CO_2 = 0,61 p. 100
2e échantillon CO_2 = 0,29 p. 100

Enregistreur { Calibre 1er échantillon 250/2,5/50/100
Calibre 2e échantillon 250/1 /50/100

vitesse de déroulement : 30 mm/mn
gaz vecteur : Hélium 80 ml/mn

Compte tenu des conditions extérieures (température : 18,5°C ; pression : 747 mm de mercure) le coefficient de correction est de 1,033 ; les valeurs corrigées sont alors :

Gaz carbonique	1,24 mV	soit	0,61	p. 100
Oxygène	40,7 mV	—	20,05	—
Azote	84,3 mV	—	79,50	—
		Total	100,16	p. 100

II. — MISE AU POINT D'UNE NOUVELLE TECHNIQUE D'EXTRACTION DES GAZ DU SOL

1. *Description du dispositif*

Le dispositif mis en place dans le sol se compose d'une micro-crépine d'aspiration constituant la microchambre de diffusion, reliée à la surface par un tube plastique d'un diamètre intérieur de 1 mm.

Cette petite chambre est un cylindre de 2,5 mm de diamètre et 4 mm de hauteur (fig. 8), limité à la base par une fine toile métallique. Le volume intérieur est environ 0,02 cm^3. Avant d'entreprendre les prélèvements, on laisse s'écouler 4 à 6 semaines afin de permettre le rétablissement de l'équilibre primitif détruit par l'introduction du dispositif.

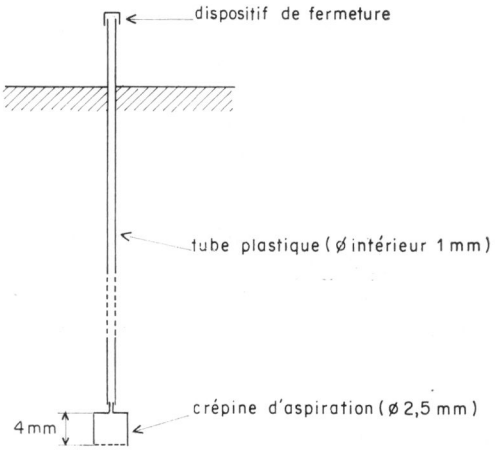


FIG. 8. — *Dispositif de prélèvement des gaz*

Les prélèvements sont effectués en adaptant d'une manière étanche l'aiguille de la seringue sur le tube plastique souple au moyen d'une pâte spéciale. Il est essentiel d'opérer le prélèvement très lentement et de ne créer qu'un faible gradient de pression. L'extrémité du tube d'échantillonnage est ensuite bouchée pour éviter la diffusion de l'air extérieur vers l'atmosphère du sol par la « cheminée d'aération »

ainsi créée. On opère un prélèvement d'un volume légèrement supérieur à celui souhaité pour permettre un ajustement plus rigoureux lors de l'introduction de l'échantillon dans la chambre chromatographique en vue de son analyse.

2. *Caractéristiques de cette technique d'extraction*

La technique d'extraction répond aux impératifs de localisation de l'échantillon et de moindre perturbation du milieu. L'atmosphère de la crépine, intégrée dans le sol, se met rapidement en équilibre par diffusion avec l'atmosphère environnante baignant les espaces interagrégats.

L'ensemble du dispositif ayant un volume nettement inférieur à celui de l'échantillon permet de recueillir une aliquote du gaz dans lequel la chambre baigne. Le gradient de pression est très faible, ce qui limite la zone de perturbation.

D'une manière théorique, il est possible de calculer le rayon de la sphère de sol centrée sur la chambre et intéressée par le prélèvement, en supposant que seul l'atmosphère de cette zone soit prélevée.

En fonction de la porosité du milieu nous obtenons les chiffres suivants :

Porosité (%)	Volume de sol contenant 1 ml de gaz (cm^3)	Rayon théorique d'exploration (cm)
20	5,0	1,06
30	3,3	0,80
40	2,5	0,60

En opérant une dépression très faible, on tend à prélever un échantillon gazeux intéressant un volume de sol très voisin du chiffre théorique calculé. Cet échantillon a une forte probabilité d'être représentatif de la microatmosphère se trouvant dans l'environnement immédiat de la crépine.

L'emploi d'une seringue hypodermique évite toute manipulation superflue. L'extraction et le prélèvement se font simultanément. L'échantillon est ensuite injecté directement dans la chambre chromatographique. Les conditions de température, de pression, de tension de vapeur d'eau restent celles du gaz en place ; il est nécessaire de les connaître.

3. *Test de reproductibilité de la technique de prélèvement et de la méthode de dosage*

Dans un milieu poreux artificiel, constitué de microbilles de verre de 0,09 mm de diamètre, des crépines ont été mises en place à différents niveaux. On dispose ainsi d'un milieu comparable à celui du sol, de porosité semblable mais dont l'atmosphère peut être plus aisément imposée et contrôlée. La composition de celle-ci était :

(CO_2 = 1,9 p. 100 $\pm$ 0,1 ; O_2 = 16,1 p. 100 $\pm$ 0,2).

Trois séries de prélèvement sont effectuées, la taille de l'échantillon variant à chaque série. La même courbe d'étalonnage est utilisée pour le dosage (tabl. 1, 2, 3).

Quel que soit l'emplacement de la crépine et le volume de l'échantillon, on constate, pour l'oxygène et le gaz carbonique, que la détermination de la concentration

TABLEAU 1

Échantillon 1 ml

Hauteur de pic exprimée en mV

Prélèvement	Gaz carbonique (mV)	Oxygène (mV)	Azote (mV)
1	3,92	31,7	89,5
2	3,90	32,4	87,9
3	3,79	31,7	89,2
4	3,90	32,0	88,1
5	3,90	32,1	88,0
6	3,93	32,2	87,7
moyenne	3,89	32,0	88,4
Écart moyen :	0,03	0,21	0,65

Gaz carbonique ..... 1,92 p. 100 ± 0,03
Oxygène ..... 16,0 p. 100 ± 0,1
Azote ..... 81,6 p. 100 ± 0,7

TABLEAU 2

Échantillon 0,4 ml

Hauteur de pic exprimé en mV

Prélèvement	Gaz carbonique (mV)	Oxygène (mV)	Azote (mV)
1	1,53	13,12	99,2
2	1,49	12,72	97,0
3	1,48	12,80	97,4
4	1,53	13,00	98,5
5	1,51	12,96	97,9
moyenne	1,50	12,92	98,0
Écart moyen :	0,04	0,34	

Gaz carbonique ..... 1,87 p. 100 ± 0,05
Oxygène ..... 16,2 p. 100 ± 0,15
Azote ..... > 95 p. 100

de ces 2 gaz est obtenue avec une bonne précision par la technique de prélèvement et le dosage chromatographique. La reproductibilité des résultats est très satisfaisante. La précision est cependant inférieure pour un échantillon de faible volume.

TABLEAU 3

Échantillon 0,2 ml

Hauteur de pic exprimée en mV

Prélèvement	Gaz carbonique (mV)	Oxygène (mV)	Azote (mV)
1	0,77	6,38	21,1
2	0,79	6,48	23,0
3	0,79	6,60	22,5
4	0,79	6,68	22,0
5	0,76	6,68	21,4
moyenne	0,78	6,56	22,0
Écart moyen :	0,05	0,60	
Gaz carbonique		1,93 p. 100 $\pm$ 0,07	
Oxygène		16,4 p. 100 $\pm$ 0,3	
Azote		> 100 p. 100	

TABLEAU RÉCAPITULATIF

Prise (ml)	Gaz carbonique (%)	Oxygène (%)	Azote (%)
1	1,92	16,0	81,6
0,4	1,87	16,2	
0,2	1,93	16,4	

La courbe d'étalonnage de l'azote faite pour 1 ml n'est plus valable lorsque l'on fait varier la prise d'essai. Cela rejoint la conclusion déjà énoncée au paragraphe précédent.

III. — UTILISATION DE CETTE MÉTHODE POUR L'ÉTUDE DE L'ATMOSPHÈRE D'UN SOL

1. *Réalisation d'une case lysimétrique au laboratoire*

En vue d'étudier facilement la technique de prélèvement, une petite case lysimétrique est réalisée au laboratoire. Elle renferme plus de 300 kg de sol et comporte six dispositifs de prélèvement décrits précédemment. Ceux-ci sont disposés à deux

hauteurs, comme indiqué sur le schéma (fig. 9), aux niveaux de sol 20 et 30 cm à partir de la surface. Deux serpentins percés de trous, placés dans la partie inférieure de la cuve, permettent par passage forcé de gaz de faire varier l'atmosphère du sol.

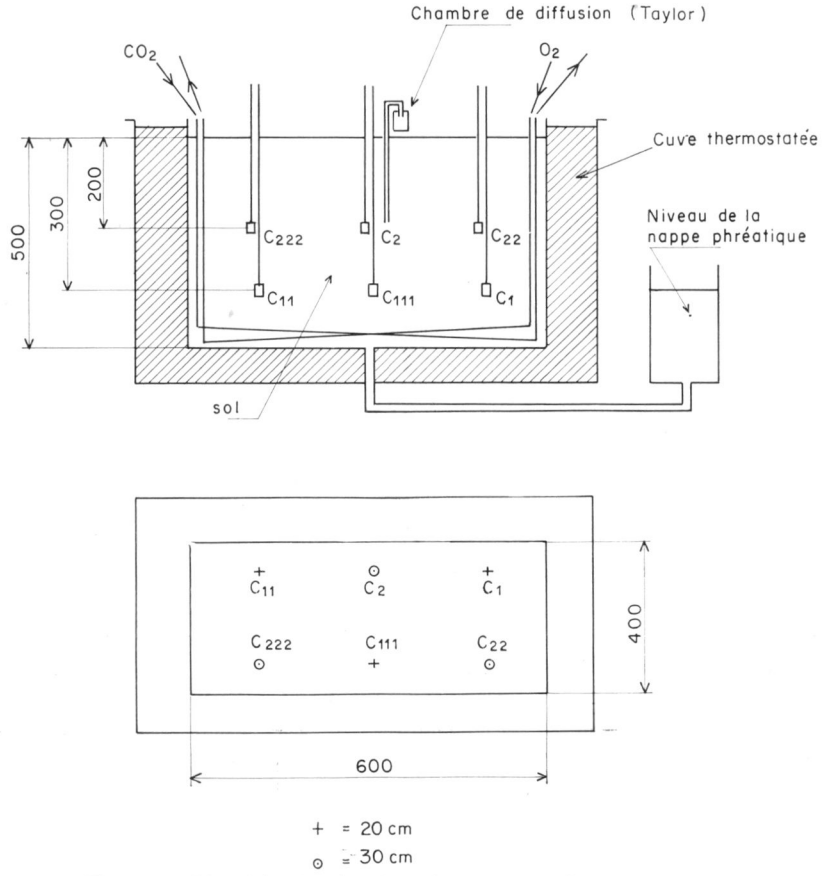


FIG. 9. — *Disposition des sites de prélèvements dans la case lysimétrique*

2. *Exemples d'études poursuivies*

Dans cet ensemble, nous avons suivi l'évolution de l'atmosphère du sol au cours du temps, dans des conditions particulières imposées.

a) *Évolution de l'atmosphère du sol à la suite de l'abaissement de la nappe phréatique.*

Le sol est mis en place dans la cuve et immergé couche par couche. Par abaissement du niveau d'eau et sous l'effet de l'évaporation, on crée un gradient d'humidité en fonction de la profondeur. On suit alors l'évolution de l'atmosphère des 2 niveaux 20 et 30 cm au cours du temps. Les premiers dosages sont effectués 48 h après l'abaissement de la nappe phréatique ; celle-ci est ensuite maintenue constante pendant toute la durée de l'expérience, au 1/4 de la hauteur du sol dans la cuve.

On constate un taux d'oxygène très différent suivant la localisation de la crépine : centre ou coin de la cuve (fig. 10 et 11). La présence de la tuyauterie conduisant au serpentin gêne lors de la mise en place du sol ; par suite le tassement de celui-ci est plus difficile à assurer, le comportement de l'eau dans cette zone à partir de la nappe s'en trouve modifié.

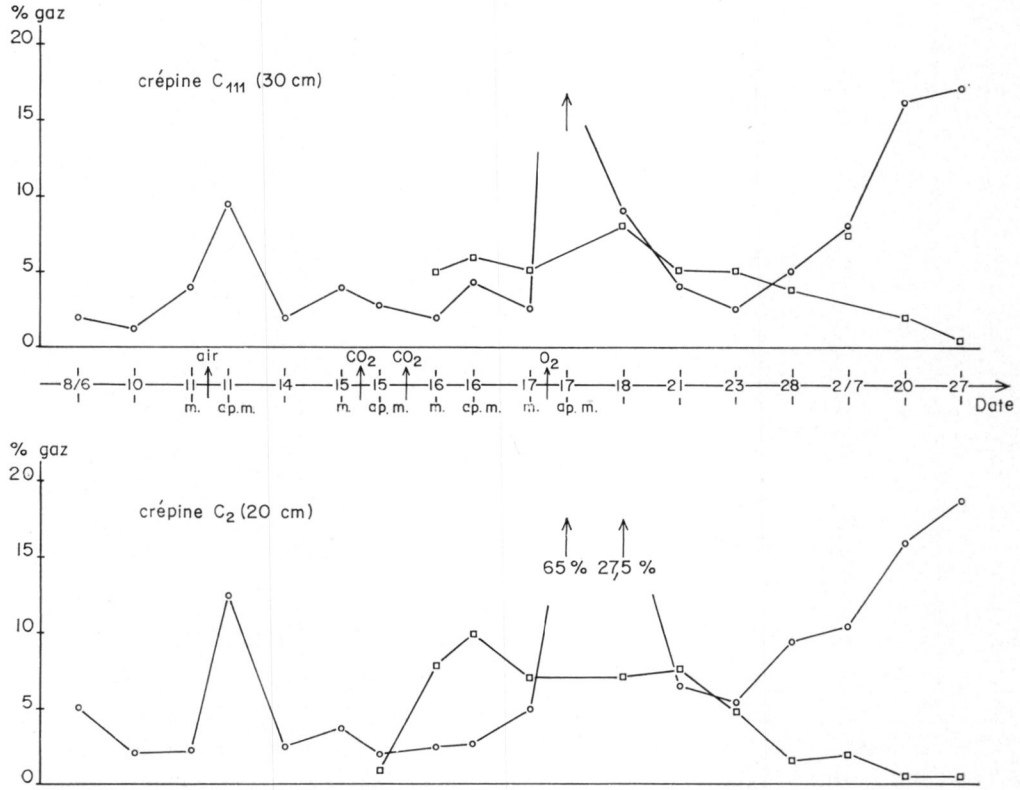


FIG. 10. — *Variation de la teneur en oxygène et gaz carbonique (crépines du centre)*

Un effet de bordure se manifeste également (2 p. 100 et 5 p. 100 d'oxygène pour les crépines C_{111} et C_2 au centre de la cuve à 20 cm et 30 cm ; 15 p. 100 et 17 p. 100 d'oxygène pour les crépines C_{11} et C_{222} dans un angle de la cuve à 20 cm et 30 cm). Au départ de l'expérience on ne relève pas de trace de gaz carbonique.

A la suite de ces constatations et en vue d'accélérer le processus, nous avons procédé de suite à un passage forcé de gaz, en suivant l'évolution de l'atmosphère.

Ainsi, le passage d'oxygène sous pression entraîne une augmentation très nette de la concentration de ce gaz dans les différentes zones de la cuve, mais 24 à 48 h après l'expérience, on retrouve le taux d'oxygène initial, comme le montre le diagramme d'évolution.

Ceci tend à traduire une impossibilité à modifier d'une façon durable la composition de l'atmosphère d'une zone de sol, si les conditions responsables de cette mauvaise

aération ne sont pas modifiées. Dans ce cas, le gaz sous pression circule préférentiellement dans certains pores, mais n'impose pas sa composition à la couche tout entière.

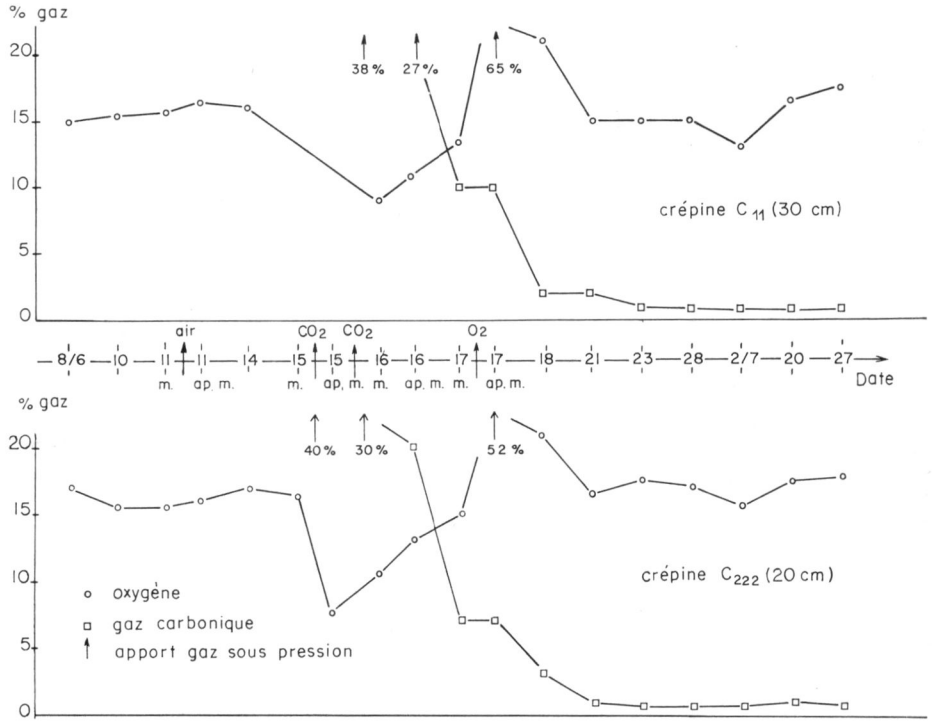


FIG. 11. — *Variation de la teneur en oxygène et gaz carbonique (crépines dans un angle)*

L'évolution est un peu différente pour le gaz carbonique. L'augmentation de la teneur à la suite du passage forcé de ce gaz est importante et se manifeste d'une façon plus durable, puisque son coefficient de diffusion est plus faible que celui de l'oxygène.

b) *Influence d'autres paramètres de diffusion.*

Nous avons considéré les facteurs susceptibles de modifier la vitesse de diffusion et cherché à mettre en évidence leur influence.

Parmi ceux-ci nous avons retenu :

la température du milieu,
la profondeur du sol,
la surface libre à la diffusion.

La case lysimétrique ayant atteint son état d'équilibre, on prend comme critère d'activité biologique en fonction des variations thermiques la production de gaz carbonique et l'on mesure sa concentration à différentes profondeurs.

Le taux de gaz carbonique, reflet de l'activité biologique, dépend de la température du milieu (tabl. 4).

TABLEAU 4

Température du sol	p. 100 CO_2
14,5	1,73
16	2,15
16	2,20
16,5	1,76
17,5	1,65
18,5	1,55
19	2,12
19	2,80
23	2,72
25	3,15

On constate, sur les figures 11 et 12, l'accroissement de la teneur en gaz carbonique résultant de son accumulation suite à une diminution de la quantité diffusée, soit par augmentation de l'épaisseur de la couche de sol examinée, soit par diminution de la surface libre accessible à la diffusion. En effet, au niveau — 30 cm, le taux de gaz carbonique est supérieur à celui du niveau — 20 cm de 30 à 50 p. 100.

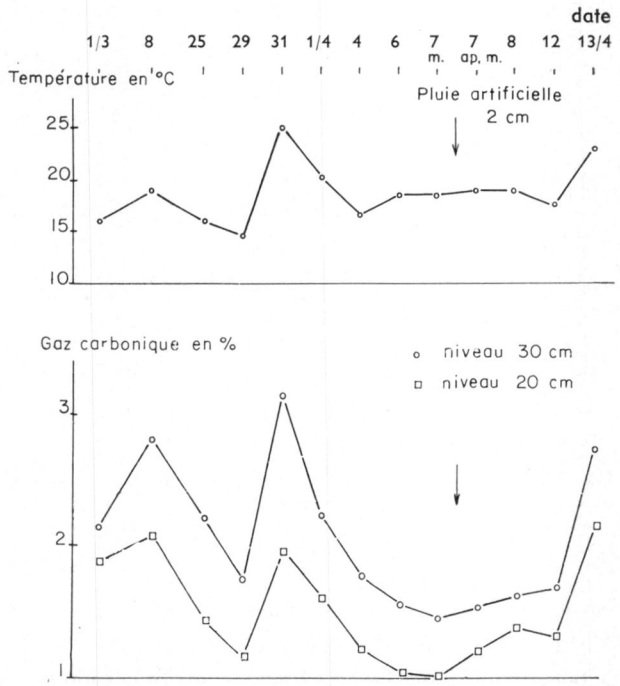


FIG. 12. — *Influence de la température sur l'évolution de la teneur en gaz carbonique*

D'autre part nous avons obtenu une réduction de la surface de diffusion de 25 p. 100 environ en humidifiant la couche supérieure par un apport d'eau correspondant à une hauteur de pluie de 20 mm. L'aire diffusante étant égale au produit de la surface par la porosité (exprimée en pourcentage), toute réduction de porosité aura pour corollaire une réduction de la surface de diffusion et provoquera une accumulation de CO_2. Sur le diagramme, on constate effectivement une teneur élevée en gaz carbonique au niveau — 20 cm, l'accroissement est plus sensible qu'au niveau — 30 cm, l'évolution de cette dernière couche se trouve retardée par rapport à la couche adjacente supérieure.

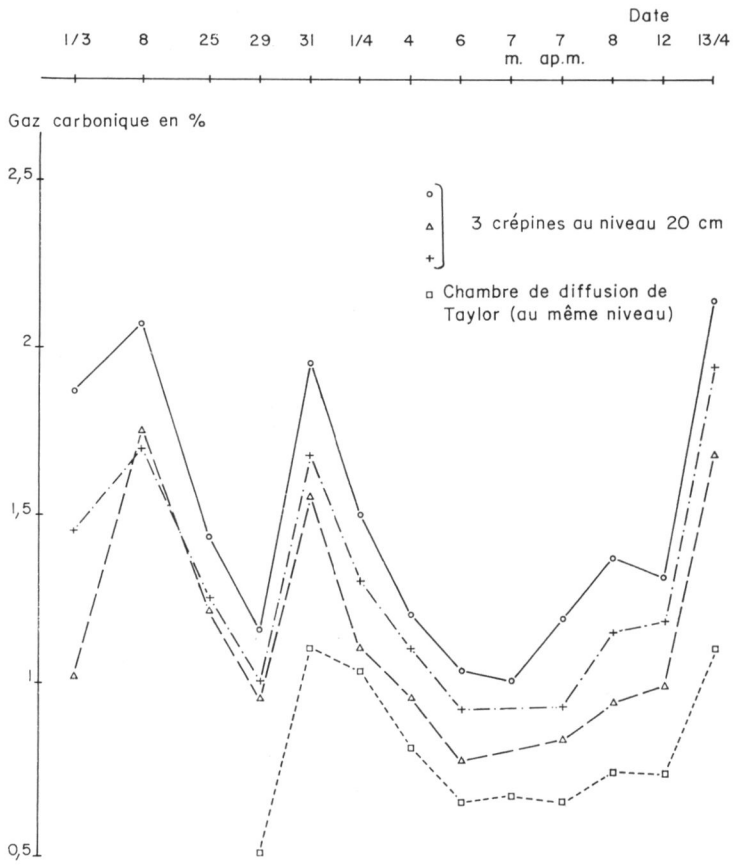


FIG. 13. — *Variation de la teneur en gaz carbonique en différents points d'un même niveau* (20 *cm*)

Dans cette série d'essais, on constate généralement une similitude d'évolution entre les différents dispositifs situés en un même niveau de sol (fig. 13 et 14).

On peut donc penser que la méthode permet, au moyen de plusieurs prélèvements effectués en des points différents d'un même niveau, de caractériser l'atmosphère

entière d'une couche de sol, et aussi de mettre en évidence les hétérogénéités locales, parfois très importantes, qui se manifestent lorsque l'atmosphère du sol n'est pas en équilibre.

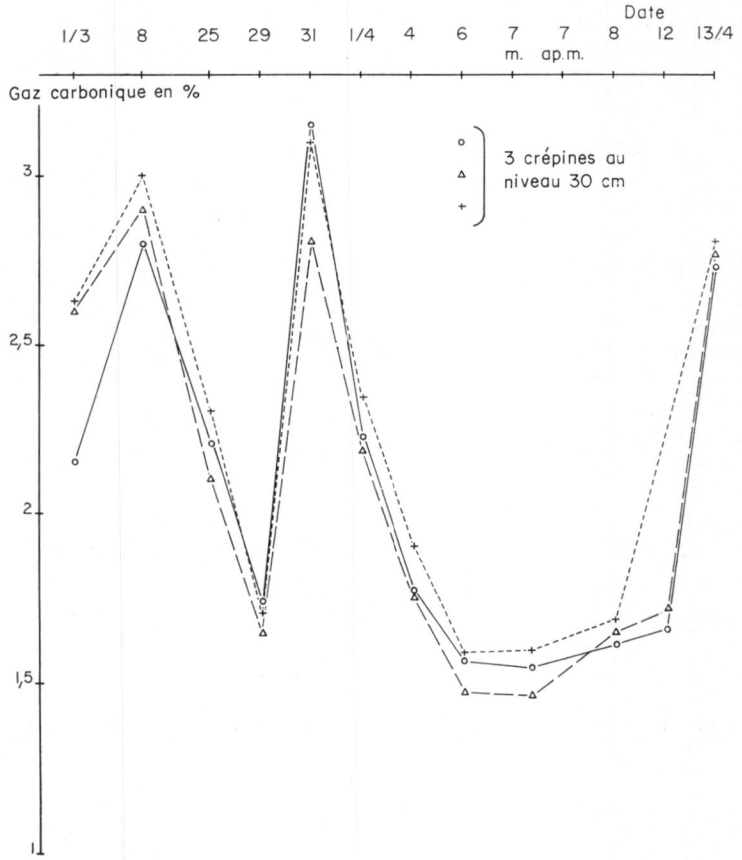


FIG. 14. — *Variation de la teneur en gaz carbonique en différents points d'un même niveau* (30 *cm*)

3. *Comparaison avec une autre technique de mesure : l'équilibre - diffusion*

Rappelons que le dispositif utilisé par TAYLOR-ABRAHAMS (1953) se compose d'une chambre de prélèvement extérieure constituée par un récipient de faible volume (100 ml environ) reliée à la zone de diffusion à étudier, située dans le sol, par un tube de verre.

A la mise en place l'ensemble extérieur (chambre et tubes de raccordement) renferme de l'air à la pression extérieure (fig. 15).

Nous avons d'abord procédé à la comparaison des deux techniques sur un milieu poreux artificiel (fig. 16), constitué de billes de verre (diamètre 1 mm) de porosité égale à 36,8 p. 100. Cette porosité a été retenue pour faciliter une mise en équilibre rapide du mélange gazeux.

L'ensemble du dispositif est maintenu à la pression atmosphérique par un tube capillaire de grande longueur.

On procède artificiellement à l'enrichissement ou à l'appauvrissement du milieu en gaz carbonique et l'on prend comme critère de comparaison le dosage de ce gaz. Celui-ci est prélevé d'une part à l'aide d'un dispositif de deux crépines situées dans l'enceinte, au sein des billes, et d'autre part dans la chambre de prélèvement elle-même.

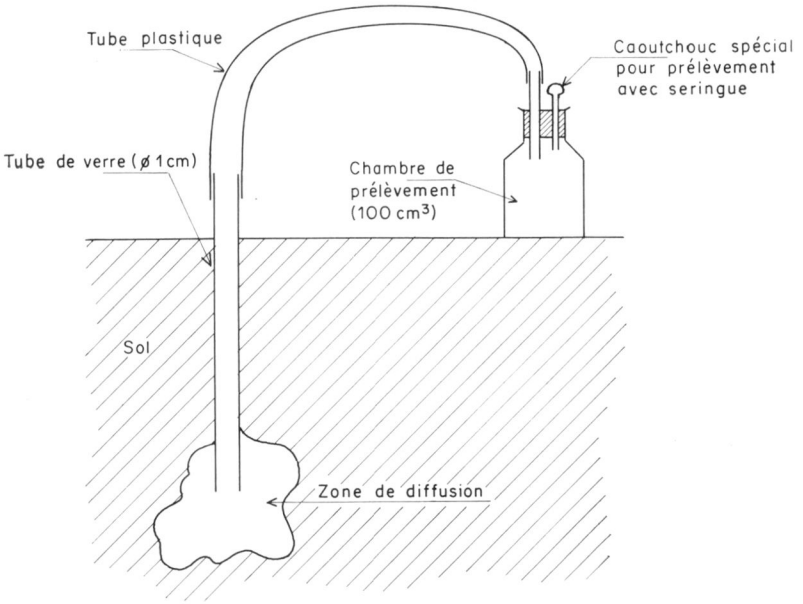


FIG. 15. — *Schéma du dispositif de la technique* ***d'équilibre*** *- diffusion de* TAYLOR

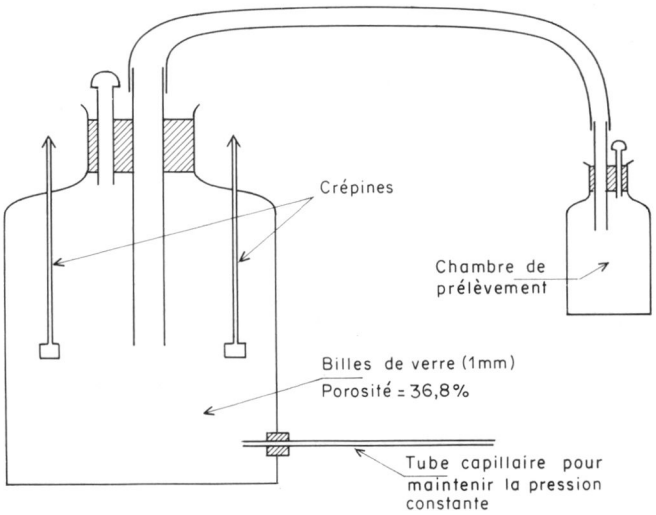


FIG. 16. — *Dispositif de comparaison des deux techniques de prélèvement : équilibre - diffusion — crépine*

On constate d'abord (fig. 17) une mise en équilibre du milieu, la teneur en gaz carbonique reste notablement plus faible dans la chambre de prélèvement. A la suite d'un enrichissement du milieu, la réponse de la technique d'équilibre-diffusion laisse apparaître une différence d'amplitude accompagnée d'un retard. Il peut même arriver que les deux techniques donnent des résultats contradictoires durant une période limitée (intervalle de temps situé entre le dernier enrichissement et la remise en équilibre).

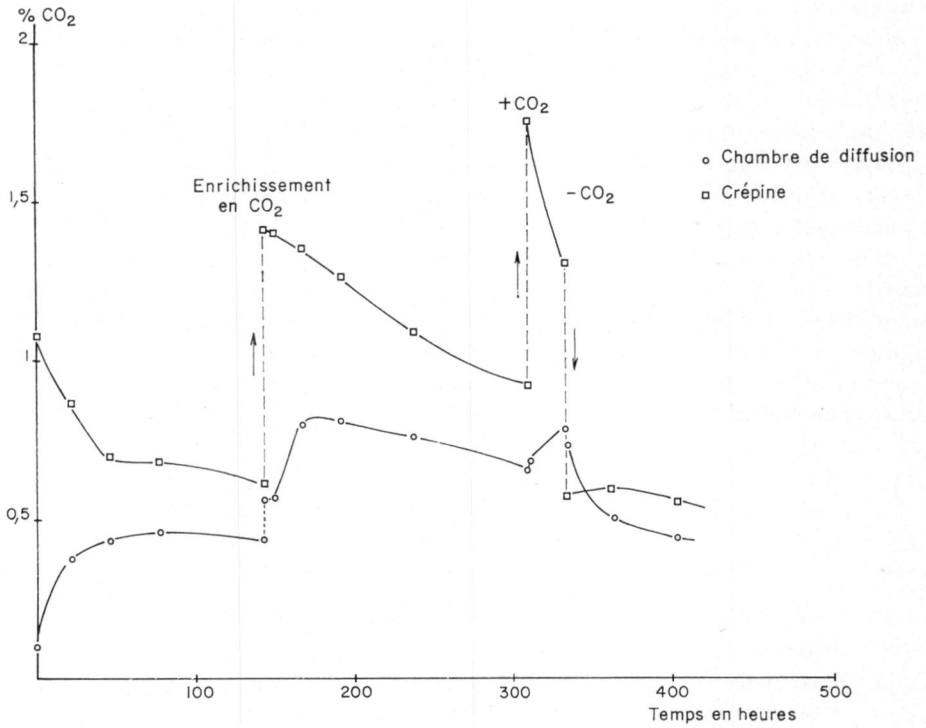


FIG. 17. — *Comparaison de l'évolution d'une atmosphère suivant le mode de prélèvement de l'échantillon gazeux*

Il est à noter que les conditions réalisées s'écartent sensiblement des conditions propres du sol où la modification de teneur d'un constituant du mélange est le plus souvent progressive. En fait, la technique d'équilibre-diffusion ne reflète que l'évolution moyenne de l'atmosphère, avec une possibilité de retard d'importance variable. Ce retard dépend du gradient de concentration entre la zone de diffusion et la chambre de prélèvement et des caractéristiques volumiques du matériel utilisé, dont les dimensions optimales sont quelques peu contradictoires, volume réduit et tube de verre de gros diamètre.

Nous avons adjoint à notre dispositif en place dans la microcase, une chambre de diffusion afin de procéder à la comparaison des techniques appliquées aux problème agronomiques.

Sur la figure 13, on note les observations faites précédemment sur la fig. 17.

Dans ce cas on n'observe pas de retard entre les réactions parce que le milieu évolue très progressivement et que nos déterminations sont discontinues dans le temps ; la fréquence de celles-ci est insuffisante pour mettre ce fait en évidence.

L'ensemble des observations confirme la nécessité absolue d'une mise en équilibre très longue (5 à 6 jours).

Ainsi la technique d'équilibre - diffusion s'apparente plutôt à un test pour caractériser un état d'aération dans un milieu en équilibre, qu'à une méthode de mesure.

Il faut noter que cette mise en équilibre ne signifie pas qu'il y ait égalité de concentration dans le milieu étudié et la chambre de prélèvement.

Pour un sol en équilibre, il n'a pas été constaté d'hétérogénéité importante dans la composition de nature à confirmer l'hypothèse de BLACK ; mais cependant, même compte tenu des faibles volumes prélevés, on ne peut affirmer qu'elle ne se manifeste pas à une échelle inférieure à celle de nos prélèvements.

Il n'est pas impossible d'envisager de diminuer le volume de la prise d'échantillon, en utilisant une crépine d'un plus faible volume et en opérant avec des références de mêmes caractéristiques.

Il est important de doser de façon très précise les trois principaux constituants, ceci afin de déceler la présence éventuelle d'autres gaz tels que le méthane et l'hydrogène sulfuré. En effet, tout écart supérieur à la somme des incertitudes sur la détermination des composants peut laisser soupçonner la présence d'un autre constituant.

Sa mise en évidence, simultanément aux constituants retenus dans cette étude, est possible mais difficile, pour les gaz cités.

CONCLUSION

La présente méthode de prélèvement associée à l'utilisation de la chromatographie en phase gazeuse comme technique de dosage permet de caractériser d'une manière extrêmement rapide l'atmosphère en un point donné, tant qualitativement que quantitavement. L'association de plusieurs prélèvements permet également de suivre l'évolution de l'atmosphère du milieu s'il se trouve en équilibre.

Il est possible d'opérer des prélèvements de faible volume sans manipulations délicates, comme cela est trop souvent le cas pour la détermination des gaz.

La précision est satisfaisante pour les composants suivants ; oxygène, azote, gaz carbonique.

Pour prélever d'une manière valable un échantillon, il faut remplir deux conditions : — opérer une prise d'un très petit volume et ceci d'une manière très lente (par cette technique la première condition est remplie ; des perspectives sont ouvertes pour abaisser encore la prise d'échantillon) ; — quant à la seconde, il faut tendre à assurer au mieux ses exigences, en particulier en opérant la dépression à une vitesse très faible.

L'étude entreprise n'avait pour but que de tester la technique ; on a pu caractériser l'atmosphère de l'espace entre les éléments structuraux, vraisemblablement en équilibre avec l'atmosphère interne.

Reçu pour publication en août 1967.

SUMMARY

MICRO-SAMPLING OF GASES IN THE SOIL

Having reviewed the reasons which warrant sampling and proportioning small volume gases, a sampling technique permitting a direct determination by gas-chromatography method is set forth. This method is particularly accurate and straightforward.

The validity of the method, as well as reproductibility of the results are then gone into.

Merely as an example, the method is applied on a reconstructed soil in the micro-container of a lysimeter so as so to follow the development of the atmosphere therein subsequent to a lowering of the ground-water table and other prescribed sharp changes. Studying the temperature effects is also contemplated.

The process developed paves the way for future investigations for proportioning the chief gases, as well as methane and hydrogen sulfide, not dealt with herein. This would allow drawing a more accurate picture of the surrounding micro-climate root.

The method, being both simple and quick, would readily allow following the dynamic pattern of many biological occurrences.

ZUSAMMENFASSUNG

ENTNAHME VON BODENGAS-MIKROPROBEN

Nach Erklärung der Gründe für die Zweckmässigkeit der Entnahme und der Dosierung von sehr kleinen Gasvolumen des Bodens, wird eine Entnahmetechnik dargelegt, die mit Hilfe der Gaschromatographie eine Bestimmung erlaubt. Die Präzision und die Einfachheit der Dosierungen werden besonders unterstrichen.

Der Wert dieser Technik, sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse werden erörtert.

Als Beispiel wird der Fall einer im Lysimeter festgehaltenen Bodenprobe untersucht, wo das Verfahren dazu angewandt wird, die infolge einer Senkung des Grundwassers und von brutal erzwungenen Veränderungen hervorgerufene Evolution der Bodengase zu verfolgen. Eine besondere Untersuchung des Temperatureinflusses soll ausserdem durchgeführt werden.

Das ausgearbeitete Verfahren bereitet künftige Untersuchungen vor, wobei die Dosierung der hauptsächlichen Gase, sowie des in diesem Aufsatz nicht erörterten Methans und Schwefelwasserstoffes durchgeführt werden könnte. Es wird erlauben, das wurzelnahe Mikroklima besser zu charakterisieren.

Infolge der grossen Schnelligkeit und Bequemlichkeit des Verfahrens, kann eine Verfolgung des dynamischen Verhaltens von zahlreichen biologischen Phänomenen vorgenommen werden.

РЕЗЮМЕ

Извлечение микро-проб почвенных газов.

М. ВИЛЭН, Ж. П. ДРЮЭЛЬ.

Авторы прежде всего напоминают для чего служат извлечение и дозировка микро-количеств почвенных газов, и описывают технические приемы взятия образцов для последующих определений с помощью хроматографии газообразной фазы. В особенности, они отмечают точность и простоту этих дозировок.

Затем рассматриваются пригодность этих технических приемов и воспроизводимость полученных результатов.

Способ этот используется, например, на восстановленной в лизиметрической делянке почве, чтобы проследить эволюцию ее атмосферы, вызванную понижением уровня грунтовых вод и резкими принудительными изменениями. Рассматривается также возможность отдельного изучения влияния температуры.

Разработанные авторами технические приемы открывают интересные перспективы для последующих экспериментов, в которых предполагается произвестид озировки главных газов почв, а также метана и сероводорода, которые не были предприняты в данной работе, что и даст возможность лучше охарактеризовать микро-климат окружающий корневую систему растений.

В виду легкости и быстроты указанного способа, можно предвидеть что он позволит проследить динамические аспекты многих биологических явлений.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLACK C. A., 1957. *Soil-Plant relationships*. John Willey and Sons. Inc. New-York.

BOUSSINGAULT, LEWY, 1853. *Ann. Chim.*, **37** (3), p. 5-50.

BUCKINGHAM E., 1904. Contributions to our knowledge of the aeration of soils. *U. S. Dept. Agric. Bureau of Soils Bull.*, nº 25.

DE VRIES D. A., 1950. Some remarks on gaseous diffusion in soils. *4 th internation. Congr. Soil Sci. Trans.*, **2**, p. 41-43.

HACK H. R. B., 1956. An application of a method of gaz microanalysis to the study of soil air. *Soil Sci.*, **217**.

LEMON E. R., 1962. Soil aeration and plant root relations. I. Theory. *Agron. J.*, **54**, p. 167-170.

PENMAN H. L., 1940. Gas and vapour movements in the soil. I. The diffusion of vapours through porous solids. J. *Agric. Sci.* 30 : p. 437-462. II. The diffusion of carbon dioxide through porous solids. *J. agric. Sci.*, **30**, p. 570-581.

ROMELL L. G., 1935. *Ann. agron.*, p. 373-384.

RUNKLES J. R., SCOTT A. D., NAKAYAMA F. S., 1958. Oxygen sorption by moist soils and vermiculite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 15.

RUSSEL, APPLEYARD, 1915. The atmosphere of the soil. *J. agric. Sci.*, **7**, 1.

SCHLOESING Th., 1873. *C. R. Acad. Sci.*, **77**, p. 203-207.

STERLING B., HENDRICKS, 1966. Salt entry into plants. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, p. 1-7.

TAYLOR G. S., ABRAHAMS J. H., 1953. A diffusion equilibrum method for obtaining soil gases under field conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, p. 201-206.

WESSELING J., VAN WIJK W. R., 1957. *Land drainage in relation to soils and crops. I. Soil physical conditions in relation to drain depth*. In LUTHIN, J. N., ed. Drainage of agricultural land pp. 461-504. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.

Ann. agron., 1967, **18** (5), 529-543

ÉTUDE DES VARIATIONS DE LA COMPOSITION PROTIDIQUE ET GLUCIDIQUE DES PARTIES AÉRIENNES DU DACTYLE

PREMIÈRE PARTIE

J.-M. LEFEBVRE et Élisabeth JOLIET

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, 21 - Dijon
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Sur un essai de Dactyle *Floréal* installé dans la région de Dijon, des prélèvements de parties aériennes ont été effectués pendant toute la période de végétation des plantes.

Leur analyse, après fixation, a permis d'examiner les répercussions de la fertilisation azotée, appliquée dans diverses conditions, sur les variations des métabolismes protidiques et glucidiques de cette graminée.

INTRODUCTION

Depuis une quinzaine d'années, de nombreuses études concernant la fertilisation du Dactyle cultivé en prairies temporaires ont été effectuées. Le Dactyle et les quelques autres espèces utilisées pour la constitution de ces prairies sont caractérisés par un haut niveau de productivité et ont fait l'objet de nombreuses recherches d'ordre génétique en vue de l'amélioration des qualités propres du végétal, comme par exemple : productivité plus forte, résistance à certaines maladies, résistance au froid, etc. Puis, les besoins de la plante augmentant avec la productivité, la fertilisation sous toutes ses formes a été étudiée de façon à définir les normes des besoins en éléments fertilisants de l'espèce considérée dans les différentes régions de France.

La plupart des auteurs ayant travaillé sur le problème de la fertilisation se sont attachés avant tout à mesurer des variations de production en matière verte ou en matière sèche en fonction des fertilisations apportées et, en analysant les plantes à la récolte, à obtenir la valeur des exportations.

Il nous a semblé intéressant de lier ces données de production à la notion de « qualité végétale » ce qui implique une étude physiologique de la plante pendant les différentes périodes végétatives : cycles végétatifs s'échelonnant au cours de

l'année, formation des réserves racinaires et aériennes soit pendant la végétation, soit pendant la période de repos hivernal. Dans ce but, nous avons choisi comme matériel d'étude un Dactyle *Floréal* cultivé dans le Centre-Est de la France, près de Dijon, et examiné quelles étaient les répercussions de la fertilisation azotée appliquée suivant un protocole permettant de faire varier les formes, les doses et les rythmes d'apport de l'azote, sur la physiologie et les variations du métabolisme foliaire de cette espèce.

Dans un premier mémoire nous examinerons pour une fertilisation azotée donnée quelles sont les variations observées dans les métabolismes protidiques et glucidiques du Dactyle au cours des différents cycles végétatifs et l'influence des variations climatiques.

MÉTHODES ET TECHNIQUES

Matériel expérimental

Rappelons que le matériel végétal choisi est le Dactyle (*Dactylis glomerata* L.) variété *Floréal* cultivé en sol brun argileux suivant un dispositif en blocs de Fisher (8 traitements, 6 répétitions) installé au domaine expérimental de l'I. N. R. A. à Bretenières près de Dijon.

La fertilisation apportée a été la suivante : 100 unités P_2O_5/ha/an, 200 unités K_2O/ha/an en deux fois.

Pour l'azote : 1er cycle : 50 U/ha ; 2e, 3e, 4e cycles : 25 U/ha.

Les prélèvements ont été effectués en 1963 et 1964, la première année étant normalement humide pour la région (658 mm/an) et la deuxième particulièrement sèche (402 mm) avec seulement deux cycles végétatifs dont le deuxième a été interrompu complètement par la sécheresse, avec arrêt total de la végétation en juillet-août.

Mode de prélèvement et traitement des échantillons

Les parties aériennes sont prélevées chaque semaine, le même jour à la même heure de la journée à raison de cinq prélèvements (d'une poignée coupée à 2 cm au-dessus du sol) dans chacune des parcelles du dispositif expérimental, soit trente prélèvements par traitement cultural. L'échantillon moyen obtenu, est coupé intimement en petits fragments d'un centimètre environ et le matériel prélevé mélangé soigneusement.

Une première prise d'essai est mise dans une étuve à 105°C en vue de la détermination de la matière sèche.

Une autre prise d'essai servant au dosage des composés azotés et glucidiques est séchée dans une étuve à vide à 45°C en présence d'un déshydratant, broyée et la poudre obtenue conservée sous vide à la chambre froide.

Méthodes d'analyses

Azote.

Le dosage de l'azote total et de l'azote protéique s'effectue de la façon suivante :

Pour *l'azote total*, un échantillon de la poudre séchée sous vide est minéralisé selon Kjeldahl après réduction des nitrates par l'acide sulfosalicylique, en présence d'alliage de DUMAZERT et MARCELLET (1938). L'ammoniaque libérée est dosée par HCl N/20 en présence de réactif de Tashiro.

Une prise d'essai pour la détermination de l'humidité est effectuée sur un autre échantillon de la poudre séchée sous vide pour la correction des valeurs obtenues pour l'azote total et les formes azotées et glucidiques solubles.

L'azote protéique est obtenu après minéralisation Kjeldahl, en présence de catalyseur, du résidu insoluble de l'extraction par l'alcool à 50°GL et dosage de l'ammoniaque libérée dans l'appareil de Parnas et Wagner.

L'extraction des *composés solubles* est effectuée, sur une prise de 2 à 3 grammes de la poudre séchée sous vide, par de l'alcool à 50°GL, à 80°C au bain-marie (MOYSE, 1950; LEFEBVRE, 1958).

6 ou 7 extractions sont effectuées dans les mêmes conditions et les liquides décantés et filtrés sur Buchner sont recueillis. Avec un volume de liquide d'extraction au moins dix fois supérieur à celui de la poudre à extraire, l'extraction des composés protidiques et glucidiques solubles est complète.

L'azote soluble total est dosé sur une partie aliquote de l'extrait traitée par l'acide sulfosalicylique pour réduire les nitrates, puis minéralisée selon Kjeldahl en présence de catalyseur de DUMAZERT et MARCELLET. La distillation est effectuée dans l'appareil de Parnas et Wagner.

Dans l'azote soluble, *l'azote ammoniacal* existe en très faible quantité à l'état libre dans les feuilles de Dactyle, son dosage est effectué dans l'appareil d'Yovanovitch par distillation sous vide à 60°C selon BACH (1932) en présence de carbonate de lithium.

Pour *l'azote nitrique*, on opère dans les mêmes conditions avec deux distillations. Une première pour éliminer l'ammoniaque préexistante, puis une deuxième après action de l'alliage Dewarda à basse température, sous vide. La valeur donnée par la deuxième distillation correspond à celle de l'ammoniaque résultant de la réduction des nitrates existant dans l'extrait. Dans ces conditions de dosage, la glutamine, amide très labile, n'est pas altérée, et la valeur obtenue correspond réellement aux nitrates.

L'azote amidé total est dosé selon VICKERY (1935). La méthode est basée sur l'hydrolyse des fonctions amides par SO_4H_2 à l'ébullition pendant trois heures. L'ammoniaque libérée est distillée dans l'appareil d'Yovanovitch. La valeur d'azote obtenue diminuée de celle de l'ammoniaque préexistante correspond sensiblement à l'azote amidé de la glutamine et de l'asparagine, les uréides glyoxyliques étant peu altérés.

Pour doser *l'azote amidé instable* qui correspond à la fonction amide de la glutamine, on hydrolyse cette fonction à l'ébullition en présence d'un tampon à pH 6,5. L'ammoniaque libérée est distillée dans l'appareil d'Yovanovitch. Déduction faite de l'ammoniaque préexistante de la solution, la valeur correspond à l'azote amidé de la glutamine.

Dans les résultats, le N total de la glutamine et le N total de l'asparagine correspondent au double de l'azote amidé correspondant.

Glucides.

Tous les dosages de glucides sont effectués après défécation de l'extrait alcoolique par le mélange acétate de zinc-ferricyanure de potassium.

Les *glucides réducteurs solubles* présents dans l'extrait sont dosés par la méthode iodométrique de SOMOGYI (1937-1952) en prenant les précautions indiquées par MOYSE (1950).

Les *glucides solubles totaux* sont dosés par la même méthode après hydrolyse par HCl à pH 2 au bain-marie bouillant.

— Le dosage direct donne la quantité de glucides réducteurs libres ; le dosage après hydrolyse acide donne la quantité de glucides solubles totaux (réducteurs libres + saccharose + polysaccharides à chaine courte). Les conditions d'hydrolyse à pH 2 à 100°C ne permettent pas l'hydrolyse sensible des matières membranaires (pectines et polyuronates) qui peuvent être entraînées par l'extraction (LIORET, 1960).

Le *saccharose* présent à l'état libre dans les extraits est dosé après action de l'invertase préparée à partir de la levure de bière activée à 37°C (BRUNEL, 1949). Une prise d'essai de la liqueur défèquée est additionnée d'une certaine quantité de solution d'invertase, de tampon à pH 4,62 et de quelques gouttes de toluène, pendant 24 heures à 37°C. On effectue un témoin eau dans les mêmes conditions. La différence entre les deux dosages donne par la méthode de SOMOGYI, en équivalents glucose, la concentration en saccharose de l'extrait.

Si l'invertase catalyse l'hydrolyse du saccharose, elle provoque aussi, quoiqu'à une plus faible vitesse, l'hydrolyse des glucofructosanes de poids moléculaire faible (DEDONDER, 1952). Les valeurs obtenues après l'hydrolyse enzymatique, diminuées des valeurs obtenues après dosage direct, ne correspondent donc pas rigoureusement à la quantité de saccharose.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce travail sur le Dactyle, espèce pluriannuelle, nous n'avons pas examiné les variations de métabolisme au cours de la première année de végétation, cette période correspondant à l'établissement de l'espèce après le semis et à l'installation d'un système radiculaire important intervenant de façon majeure dans le stockage des réserves glucidiques et protidiques nécessaires à la végétation.

Par contre, nous nous sommes intéressés aux autres années de végétation. Elles sont caractérisées par plusieurs cycles végétatifs ; d'abord un cycle de reproduction avec sortie d'un épi et floraison se situant au cours du mois de mai. Il est interrompu par une coupe intervenant au cours de l'épiaison, opération qui a pour effet de supprimer l'inhibition de développement due à la présence des ébauches florales au cours du développement.

Après cette coupe, en deuxième cycle on a un développement important de talles herbacées, la suppression de l'inhibition entraînant une reprise du tallage avec émission de talles et de racines coronales aux dépens des réserves stockées dans les parties basses des plantes.

Ce cycle est modifié par des interventions tendant à régulariser la végétation avec des coupes se situant tous les 40 à 50 jours en période estivale suivant la température et l'humidité. Lors de ces coupes la majeure partie des tissus photosynthétiques actifs sont prélevés mais les méristèmes épargnés vont fournir une repousse avec ré-émission de feuilles, de talles et de nouvelles racines. La vitesse et l'importance de cette repousse vont dépendre étroitement des disponibilités alimentaires qui peuvent provenir, soit des réserves mobilisables accumulées dans les parties ayant échappé au prélèvement comme les organes souterrains, les gaines et le bas des tiges, etc., soit de l'activité photosynthétique des organes restant, soit du sol comme fournisseur d'eau et d'éléments fertilisants.

Variations de l'azote total (fig. 1)

L'examen des résultats obtenus pendant deux années consécutives de végétation caractérisées par des conditions météorologiques très différentes montre pour les variations de l'azote total une similitude parfaite de phénomènes dans les différentes périodes végétatives.

En 1963, dans le premier cycle végétatif allant du départ de la végétation à la floraison, l'azote total exprimé en pourcentage de la matière sèche diminue régulièrement au fur et à mesure du prélèvement pour atteindre 2 p. 100 au moment de la coupe se situant au cours de l'épiaison.

Au cours du deuxième cycle nous observons le même phénomène mais avec de beaucoup plus grandes variations puisque les valeurs passent de 4 p. 100 au début pour atteindre 1,4 p. 100 à la fin de cette période végétative.

Dans le cas où l'on a une année normalement humide pour les troisième et quatrième cycles on observe d'abord une augmentation de l'azote total plus rapide que l'augmentation de la matière sèche puis une diminution régulière jusqu'à la fin de chaque période végétative considérée pour atteindre des valeurs de l'ordre de 1,3 p.100 de la matière sèche.

Cette augmentation très rapide de l'azote total correspond à une absorption de l'azote et à une synthèse protéique proportionnellement plus intense que la synthèse glucidique génératrice de composés cellulosiques.

En 1964, année de très grande sécheresse estivale, au début du deuxième cycle les variations sont dans le même sens que celles indiquées ci-dessus et après un arrêt de végétation les quantités d'azote total présentes dans les échantillons conservent une valeur régulière jusqu'à la fin de la végétation en automne : valeur se situant autour de 2 p. 100 de la matière sèche.

Ces résultats mettent en évidence un état d'équilibre entre la protéogenèse et la protéolyse, alors que si la sécheresse était intervenue sur des feuilles beaucoup plus jeunes au début du cycle, les phénomènes d'oxydation des amino-acides et d'hydrolyse des protéines l'auraient emporté et les courbes de variations auraient montré des différences importantes entre les deux années de végétation dans la composition foliaire.

Variations de l'azote protéique (fig. 1)

Tout en présentant certaines analogies avec les variations de l'azote total, celles de l'azote protéique, représentant dans le bilan la différence entre l'azote total et l'azote soluble total, sont plus affectées par les variations de métabolisme surtout au début des cycles végétatifs où l'on observe d'importantes accumulations transitoires de nitrates, d'amides et d'amino-acides dont la condensation en protéines n'est pas encore faite.

Dès que l'on avance dans le cycle, la régularité devient beaucoup plus grande.

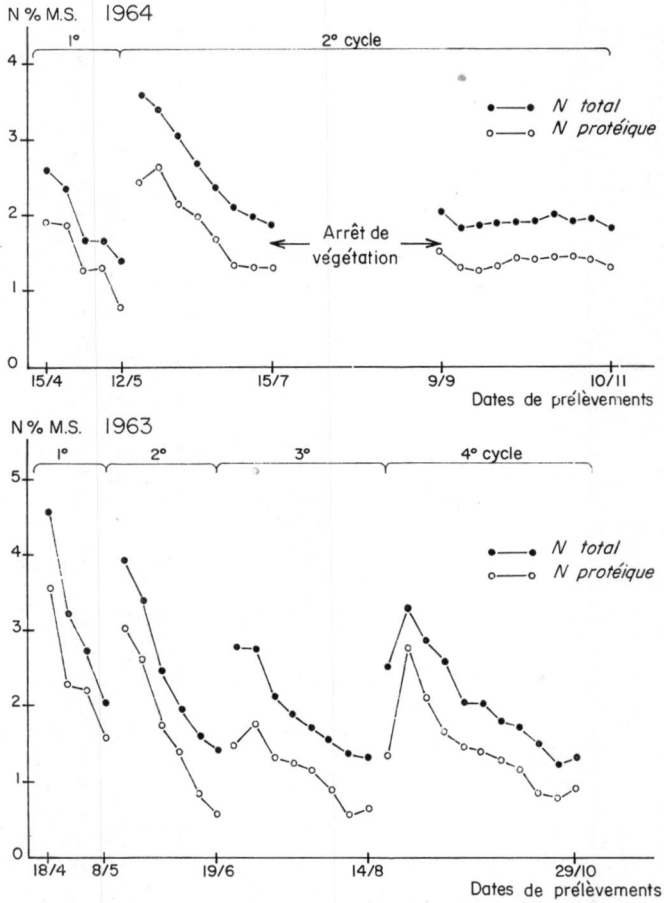


FIG. 1. — *Variations de l'azote total et de l'azote protéique au cours de la période de végétation chez le Dactyle* Floréal *en 1963 et 1964*

Dans les deux premiers cycles végétatifs, la décroissance de l'azote protéique est régulière au fur et à mesure des prélèvements du fait de l'augmentation de la matière sèche proportionnellement plus rapide que l'enrichissement en azote.

Dans le cas des périodes végétatives se situant au cours et à la fin de l'été, on observe d'abord une augmentation très rapide des quantités d'azote protéique pendant les deux premières semaines de végétation après la coupe suivie d'une décroissance d'abord rapide, puis plus lente s'étageant sur un laps de temps assez long. La diminution la plus lente et la plus régulière se situe dans la dernière période végétative à un moment où la croissance est très ralentie et où la photosynthèse est faible.

En examinant les variations de l'azote total et de l'azote protéique nous avons pu mettre en évidence une relation hautement significative entre ces deux valeurs, relation caractérisée par les droites de régression suivantes :

en 1963 : $y = 0{,}844\,x - 0{,}380$. Très hautement significative à 1 p. 100. $r = 0{,}98$

en 1964 : $y = 0{,}809\,x - 0{,}254$. Très hautement significative à 1 p. 100. $r = 0{,}94$

où y représente l'azote protéique et x l'azote total (fig. 2).

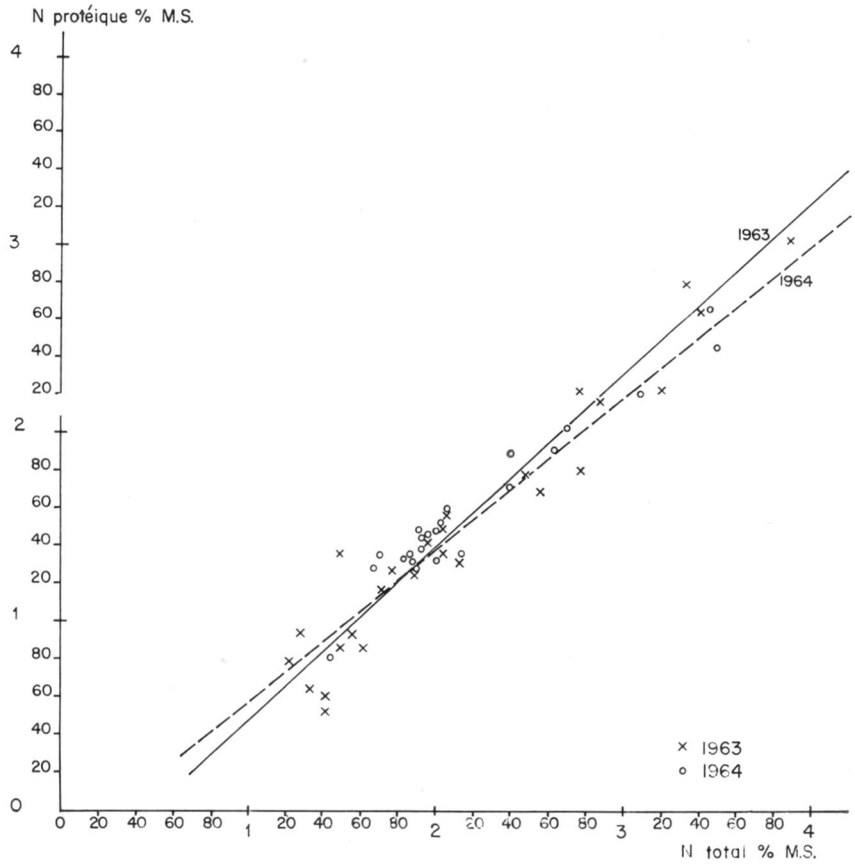


FIG. 2. — *Relation azote total - azote protéique chez le Dactyle* Floréal

1963 $y = 0{,}844\,x - 0{,}380$ y = N protéique

1964 $y = 0{,}809\,x - 0{,}254$ x = N total

Ces relations, comme nous le verrons dans un autre mémoire, ont été établies non seulement pour des dactyles cultivés dans les conditions expérimentales indiquées dans ce mémoire, mais également pour d'autres traitements azotés très différenciés et pour tous les cycles végétatifs des deux années de végétation.

Ces droites de régression montrent une très grande stabilité dans les réactions du dactyle *Floréal* cultivé dans des conditions très différentes (climats, traitement azoté, rythmes d'apport de l'azote, etc.) et l'intérêt d'une telle relation dans l'étude du comportement d'une espèce végétale donnée.

Variation de l'azote organique total (tabl. 1)

L'examen des variations de l'azote organique total donne de façon précise l'allure générale des synthèses des formes organiques azotées : amino-acides, amides, peptides et protéines, cette synthèse étant, pour la fraction azotée protéique, le résultat au cours de la croissance d'un bilan positif entre protéogenèse et protéolyse.

Les valeurs obtenues montrent un classement en deux catégories suivant que l'on a affaire au premier cycle végétatif se situant au printemps, et aux autres périodes concernant les cycles d'été à une période où les températures du sol et de l'air plus élevées modifient les phénomènes.

Au printemps, on remarque que dans l'azote organique total, environ les 4/5 de l'azote sont sous forme protéique et le reste sous forme soluble : amides au début du cycle puis amino-acides ensuite.

Dans les périodes estivales se situant après la première coupe, par contre, la métabolisation de l'azote avec condensation en formes organiques complexes, peptides et matières protéiques, est beaucoup plus rapide et l'on a peu d'azote organique soluble dans les prélèvements.

A la fin de la période végétative, en octobre, novembre, lorsque les feuilles deviennent plus âgées, avant l'arrêt de la végétation, on assiste à une légère augmentation de la quantité d'azote organique soluble due à une accélération de la protéolyse dans les limbes foliaires sénescents ; celle-ci l'emportant sur la protéogenèse dans ces organes âgés (LEFEBVRE, 1958).

En complément des observations décrites ci-dessus, on peut constater en examinant les variations de l'azote organique soluble qu'au début de chaque cycle végétatif après un apport d'azote nitrique sur les plantes, on a une augmentation importante, dans les quantités d'azote organique soluble, de l'azote appartenant aux amides, celles-ci représentent une des phases intermédiaires de la synthèse protéique à un moment où les phénomènes respiratoires sont plus développés du fait des blessures occasionnées aux limbes foliaires et aux gaines par la coupe des parties aériennes.

Ensuite, les parties foliaires reprennent une activité normale, les quantités d'amides diminuent rapidement et l'on observe une apparition de quantités importantes d'amino-acides et d'autres formes azotées telles que des peptides de faible poids moléculaire, puis une synthèse protéique active.

Comme nous l'avons constaté lors de l'examen des variations de l'azote organique total, les quantités d'azote organique soluble diminuent au cours de chaque cycle ce qui traduit une synthèse protéique importante ; puis, à la fin de chaque période végétative, on assiste de nouveau à une augmentation de ces formes solubles

engendrées très probablement par une légère protéolyse libératrice d'amino-acides et de peu d'amides, celles-ci ne faisant partie que pour environ 5 p. 100 de la composition des protéines végétales (LUGG, 1939).

Variation des amides (tabl. 1)

Comme nous venons de le voir ci-dessus, les quantités d'amides, glutamine et asparagine principalement, sont assez importantes au début de chaque cycle après l'apport azoté et atteignent chez des plantes ayant reçu une fertilisation azotée de 50 Un./ha des valeurs variant du tiers à la moitié de celles de l'azote organique soluble, le reste étant représenté par des amino-acides et des peptides.

Les quantités trouvées diminuent rapidement pour atteindre des valeurs très faibles de l'ordre de 40 à 60 mg pour 100 g de matière sèche.

Dans la composition de ces amides, l'asparagine intervient pour une part importante dans le bilan, surtout au début des cycles quand les quantités d'amides sont importantes.

Variations des amino-acides et peptides de faible poids moléculaire

Dans ce groupe correspondant sensiblement à la différence entre l'azote organique soluble et l'azote total des amides, nous avons réuni volontairement les amino-acides et leurs formes de condensation de faible poids moléculaire solubles dans le réactif d'extraction.

Les quantités représentées exprimées en azote sont importantes et sont comprises pendant tous les cycles végétatifs soit de printemps, soit d'été et d'automne entre 0,4 et 0,7 p. 100 de la matière sèche avec des valeurs restant élevées à la fin des cycles, ceci étant probablement dû à un vieillissement des feuilles avec légère protéolyse et diminution de la synthèse protéique.

Variations de l'azote minéral (tabl. 1)

Dans l'azote minéral qui comprend des nitrates et de l'ammoniaque libre, cette deuxième forme représente toujours des quantités très faibles tout au long de la végétation quels que soient les cycles étudiés. Par contre, les nitrates libres correspondent à des quantités importantes d'azote, surtout au début des cycles : 0,4 p. 100 de la matière sèche, puis diminuent rapidement avec leur métabolisation après réduction pour atteindre des valeurs très faibles de l'ordre de 0,06 p. 100 au milieu des cycles d'été et d'automne.

Il est à noter que, pendant les cycles de printemps, les quantités de nitrates existant dans la matière sèche diminuent relativement peu et restent fixées à des valeurs élevées de l'ordre de 0,15 p. 100 de la matière sèche. Dans les périodes estivales, par contre, elles sont beaucoup plus faibles, la métabolisation étant très rapide au fur et à mesure de l'absorption des nitrates du sol ; les valeurs moyennes se situent autour de 0,05 à 0,07 p. 100 N/NO_3 pour 100 g de matière sèche.

Comme l'a indiqué BONNER en 1950, les teneurs en nitrates des feuilles peuvent être très élevées sans que l'on remarque de troubles graves de métabolisme. Dans le cas du *Ray-grass italien*, plus particulièrement, NOWAKOWSKI (1965) met en évi-

TABLEAU I

Résultats d'analyse (année 1963) exprimés en p. 100 de matière sèche

Dates	1er cycle				2e cycle						3e cycle			
	18-4	25-4	2-5	8-5	16-5	22-5	31-5	6-6	13-6	19-6	27-6	4-7	11,7	18-7
N organ. total .	4,4	3,0	2,6	1,8	3,6	3,0	2,3	1,8	1,6	1,1	2,5	2,6	2,0	1,8
N organ. soluble	0,76	0,73	0,37	0,28	0,55	0,37	0,51	0,39	0,72	0,47	1,04	0,83	0,65	0,52
N des amides ..	0,27	0,09	0,10	0,07	0,19	0,13	0,04	0,06	0,30	0,07	0,10	0,05	0,05	0,06
N des aminoaci.	0,49	0,64	0,27	0,2	0,36	0,23	0,47	0,33	0,69	0,40	0,94	0,78	0,10	0,46
N nitrique.....	0,19	0,13	0,15	0,19	0,28	0,39	0,17	0,13	0,03	0,09	0,19	0,11	0,13	0,07

Dates	3e cycle				4e cycle									
	24-7	1-8	8-8	14-8	21-8	28-8	4-9	11-9	18-9	25-9	2-10	9-10	16-10	23-10	29-10
N organ. total .	1,6	1,5	1,3	1,2	2,2	3,2	2,8	2,4	1,9	2,0	1,7	1,6	1,4	1,2	1,2
N organ. soluble	0,49	0,53	0,79	0,56	0,82	0,38	0,59	0,72	0,42	0,60	0,41	0,47	0,57	0,36	0,23
N des amides ..	0,03	0,06	0,07	0,07	0,27	0,09	0,10	0,25	0,04	0,08	0,06	0,07	0,08	0,08	0,06
N des amino ac.	0,46	0,47	0,72	0,49	0,55	0,29	0,49	0,47	0,38	0,52	0,35	0,40	0,49	0,28	0,17
N nitrique.....	0,04	0,06	0,05	0,07	0,24	0,13	0,07	0,11	0,08	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,08

dence des valeurs se situant entre 1,10 et 2,80 p. 100 de N/NO_3 dans la matière sèche pour des plantes recevant des doses très élevées d'azote au cours de la végétation et à une température non favorable à la réduction des nitrates.

Variations des glucides (fig. 3)

Les glucides constituent une fraction importante de la composition des plantes de l'ordre de 60 p. 100, en dehors de l'eau. Ils se trouvent soit sous forme, pour la majeure partie, de glucides condensés en composés cellulosiques ou de réserves (amidon, inuline) soit de glucides solubles en cours de métabolisation dans les tissus, pour une partie plus faible.

Dans ce travail ayant pour objet de déterminer les variations du métabolisme au cours de la croissance nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux glucides solubles, réservant pour des publications ultérieures l'examen des variations des fractions cellulosiques, des fructosanes condensés, etc.

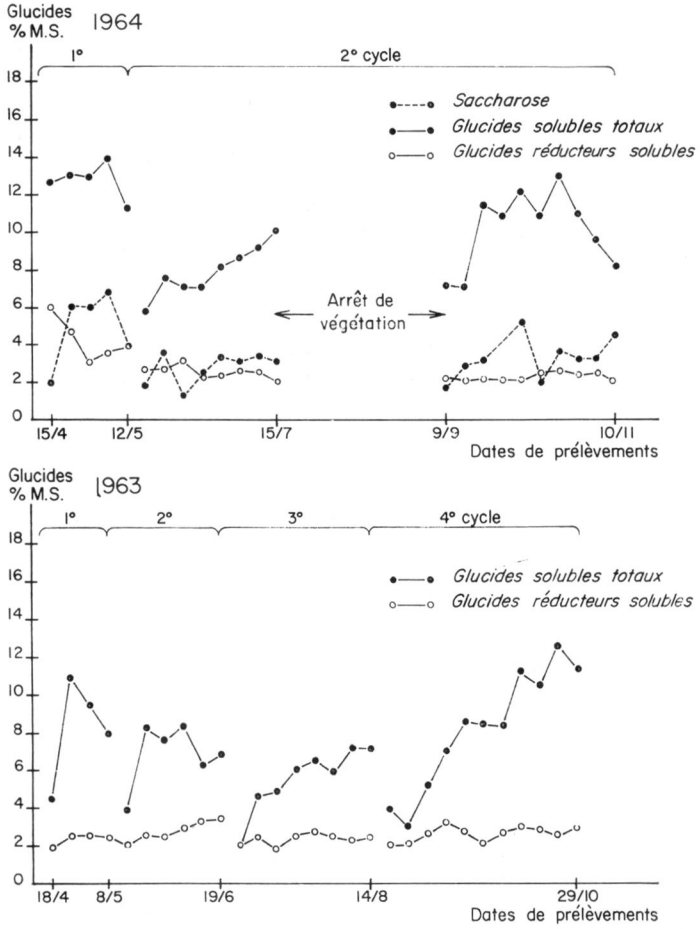


FIG. 3. — *Variations des glucides solubles au cours de la période de végétation chez le Dactyle* Floréal *en 1963 et 1964*

Les valeurs des glucides solubles totaux sont élevées surtout au premier cycle végétatif de printemps où, en 1963, on obtient des valeurs comprises entre 5 et 11 p. 100 de la matière sèche et en 1964 encore plus élevées de l'ordre de 13 p. 100 pendant tout le cycle.

Après la première coupe, les valeurs sont plus faibles et montrent des fluctuations importantes, les limites extrêmes de ces fluctuations se situant entre 2 et 8 p. 100 de la matière sèche.

A la fin de la dernière période végétative, avant l'arrêt de la végétation, on constate, de façon similaire dans les deux années d'étude, l'augmentation importante des quantités de glucides solubles dans les prélèvements. Les valeurs atteignent et même dépassent quelquefois 12 p. 100 de la matière sèche. La progression de cette augmentation est régulière dans le temps.

En 1964, du fait de la sécheresse, le deuxième cycle végétatif a été interrompu à partir du 15 juillet jusqu'au 10 septembre. Cette sécheresse est responsable de la disparition totale des parties aériennes des plantes donc de tous les limbes et gaines foliaires, seul matériel permettant les synthèses carbonées. Les plantes ont repoussé au mois de septembre avec une température moyenne plus faible, et il est à noter que les valeurs des glucides solubles totaux trouvées après cet arrêt de végétation correspondent sensiblement à celles observées au mois de juillet avant l'arrêt de végétation des parties aériennes. Cette observation ne correspond pas à ce qu'il était vraisemblable d'attendre de l'examen des végétaux.

En effet, les alternances rapides de turgescence et de plasmolyse des tissus accélèrent les phénomènes respiratoires des parties vertes, phénomènes ayant pour substrat les glucides solubles des tissus (Moyse, 1950), ce qui devrait en faire diminuer les quantités présentes, leur synthèse étant très ralentie. Les variations de la teneur en eau des tissus se situent entre 50 et 70 p. 100 en quelques heures. Chez le dactyle, on observe un début de flétrissement à partir de 35 p. 100 de matière sèche dans les feuilles ; les chiffres cités montrent donc une déshydration assez avancée des tissus qui en amène la mort assez rapidement.

En résumé, tout se passe comme si la végétation avait été continue, et les synthèses normales.

Les quantités de glucides réducteurs solubles trouvés dans les parties aériennes sont beaucoup plus faibles, et en général, beaucoup plus stables dans le temps.

Pendant tout le cours de la végétation, les valeurs sont comprises entre 2 et 3 p. 100 de la matière sèche. De plus, elles sont importantes au printemps puis plus faibles dans les périodes estivales.

Correspondant essentiellement à des hexoses et à de petites quantités de pentoses, les valeurs exprimées par ces résultats caractérisent un certain équilibre entre synthèse par photosynthèse, destruction par respiration et polymérisation sous forme de glucofructosanes à chaînes plus ou moins longues.

Dans les variations des glucides solubles, nous avons voulu nous rendre compte des quantités représentées par le saccharose qui représente la première forme de condensation.

Les variations en sont très rapides en un temps très court, les valeurs extrêmes étant comprises entre 1,25 et 7 p. 100 de la matière sèche dans le premier cycle de 1964 et entre 1 et 5 p. 100 au cours du deuxième cycle (fig. 3).

Dans le cas du saccharose, nous n'avons malheureusement pas pu comparer les résultats des deux années de végétation, les dosages n'ayant pas été effectués en 1963. Il est manifeste que le saccharose représente un élément très important dans la métabolisation des glucides avec alternance de périodes de synthèse et de condensation.

Dans le cas de l'arrêt de végétation dû à la sécheresse, il est à noter, comme nous l'avons déjà fait remarquer précédemment, une continuité parfaite dans les quantités de ce glucide qui se situent à cette période autour de 2,5 p. 100 de la matière sèche.

CONCLUSION

Dans cette étude effectuée sur des plantes ayant eu des périodes de croissance très différentes au cours des deux années examinées : 1963 et 1964, l'une normalement humide, la deuxième particulièrement sèche, nous avons pu mettre en évidence un certain nombre de caractéristiques de la physiologie du Dactyle.

La diminution de teneur en azote total et en azote protéique de la matière sèche est d'autant plus lente que l'on passe des cycles végétatifs de printemps aux cycles d'été et d'automne. Les plantes très jeunes sont très riches en azote, comme nous le savons depuis longtemps, puis avec l'enrichissement en glucides condensés, cette teneur diminue plus ou moins rapidement avec l'activité de la photosynthèse.

Dans le cadre de ce travail le Dactyle a reçu une fertilisation azotée modeste au cours des différents cycles, mais malgré ce fait le phénomène de décroissance de la teneur en azote est facilement mis en évidence.

A ce niveau de fertilisation, les valeurs de l'azote protéique suivent très régulièrement celles de l'azote total, l'azote minéral, en particulier les nitrates, étant en quantités très faibles ; il est à noter que nous n'avons trouvé que des traces d'ammoniaque dans la fraction soluble, et des doses faibles de nitrates, sauf en début des cycles après l'apport de la fertilisation, ce qui est normal car la plante ayant un système foliaire très réduit par la coupe présente un certain retard à la réduction des nitrates, les quantités absorbés dans le même temps étant beaucoup plus importantes.

Au début des cycles, on trouve dans l'azote organique soluble une certaine quantité d'amides puis rapidement, seulement des amino-acides et des peptides de poids moléculaire peu élevé.

Ces corps représentent le résultat d'un équilibre entre les protéogenèses et protéolyses continues dont les parties foliaires sont le siège au cours de la végétation.

Les glucides présentent des variations très rapides et très importantes dans les premiers cycles, puis dès le début de l'été ; par contre, l'enrichissement en glucides solubles totaux est irrégulier, alors que les glucides réducteurs solubles présentent une assez grande régularité au long de l'année même après une saison sèche prolongée.

Nous n'avons pas pu mettre en évidence d'accumulations de saccharose comme l'a constaté GAUSSÈRES (1965), mais pour ce glucide nous observons une alternance très rapide d'enrichissement et de disparition probablement par condensation en glucofructosanes de poids moléculaire plus élevé.

Il est à noter, dans le cas de ce glucide, l'importance sur ses variations des migrations des réserves des racines et du collet vers les feuilles en période froide.

Pour le Dactyle *Floréal* nous avons examiné les variations du rapport glucides solubles totaux/matières azotées (N × 6,25), (fig. 4). Nous avons toujours trouvé des valeurs plus élevées que celles indiquées dans la littérature : variables au premier cycle entre 0,2 et 0,6 en 1963, 0,8 et 1,3 en 1964 et par contre, très comparables pour les autres cycles au cours des deux années de végétation, avec des valeurs un peu plus fortes que celles indiquées par JARRIGE (1961) et, pour le *Dactyle 15 danois demi-tarif* par FAUCONNEAU et JARRIGE (1955).

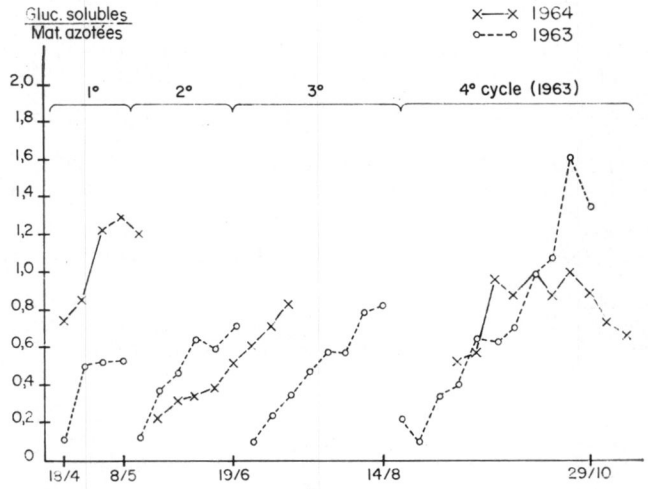


FIG. 4. — *Variations du rapport:* $\frac{\textit{glucides solubles}}{\textit{matières azotées}}$ *au cours de la végétation du Dactyle* Floréal *en 1963 et 1964*

En 1963 pour les 2e, 3e et 4e cycle, l'augmentation en est très régulière ; dans le cas de 1964 après la sécheresse estivale, dans les repousses on assiste à une sorte de stabilisation suivie d'une diminution du rapport qui se situe alors aux environs de 0,8.

Reçu pour publication en juillet 1967.

SUMMARY

STUDY OF VARIATIONS OF THE PROTEIN AND GLUCIDE COMPOSITION OF THE ABOVE-GROUND PORTION OF « DACTYLIS » (FIRST REPORT)

On the « Floréal » Dactylis investigated, which is cultivated with but little nitrogenous fertilizer, substantial differences are noted between the first cycle, that of vegetative reproduction, and those in summer and autumn, whose chief feature is a more or less speedy growth of foliage, dependently on climatic conditions.

In spring and early summer, the total nitrogen, proteinic and soluble organic nitrogen decrease steadily and quickly in the dry matter throughout the cycles.

In summer and autumn, this occurrence is the same but the protein content decreases much more slowly, it being practically nil on the growth being over.

The soluble glucide reducers remain constant throughout the cycles whereas the total soluble glucides increase rapidly and decrease likewise during the first cycles, then growing speedily and steadily to reach ultimately high values in autumn.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER VARIATIONEN DER EIWEISS- UND KOHLENHYDRATVERBINDUNGEN BEI DEN LUFTTEILEN DES KNAULGRASES (ERSTE AUFSATZ)

Bei dem mit einer schwachen Stickstoffdüngerdosis kultivierten Knaulgras « Floréal », wurden bedeutsame Unterschiede in dem Eiweiss- und Kohlenhydratstoffwechsel beobachtet und zwar zwischen dem ersten vegetativen Zyklus, dem Fortpflanzungszyklus und den, gemäss den Witterungsverhältnissen durch eine mehr oder weniger rasche Blattentwicklung im wesentlichen charakterisierten Sommer- und Herbstzyklen.

Während des Frühlings und zu Sommeranfang vermindern sich totaler Stickstoff, der Stickstoff des Eiweisses und der organisch lösliche Stickstoff regelmässig und schnell in der Trockenmasse von Anfang an bis zum Ende der Zyklen.

Im Laufe des Sommers und des Herbstes tritt dasselbe Phänomen auf, aber die Abnahme des Gehaltes an diesen Eiweissstoffen ist viel langsamer und hört fast völlig auf am Schluss des Wachstums.

Die löslichen Reduktionskohlenhydrate bleiben konstant vom Anfang bis zum Ende der Zyklen, wogegen die totalen löslichen Kohlenhydrate sich rasch vermehren, sich nachher ebenso rasch vermindern in den ersten Zyklen und schnell und regelmässig anwachsen, um grosse Werte im Herbst zu erreichen.

РЕЗЮМЕ

Изучение изменений содержания белков и сахаров в надземных частях ежи.

(1-ая часть)

Ж. М. ЛЕФЕБВР, Елизавета ЖОЛИЭ.

Ежа сорта « Флореаль », выращенная при внесении малых доз азота, служила для данного изучения; авторы отметили сильные различия в метаболизме белков и сахаров первого вегетационного цикла (цикл репродукции) и летних и осенних циклов, которые характеризуются, главным образом, более или менее быстрым ростом листьев, в зависимости от климатических условий.

Весной и в начале лета количества общего, белкового и органического-растворимого азота, в сухом веществе ежи, регулярно и быстро уменьшаются с начала и до конца каждого цикла.

Летом и осенью наблюдается то-же явление, но уменьшение содержания белков происходит замедленным темпом и даже имеет тенденцию прекращения к концу вегетационного периода.

Количество растворимых сахаров-восстановителей остается на одном и том-же уровне, с начала и до конца циклов, в то время как общее содержание суммарных сахаров сначала быстро увеличивается, затем также быстро уменьшается в течении первых циклов и, наконец, снова возрастает, вплоть до достижения крупных величин осенью.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BACH D., 1932. Dosage de l'ammoniaque par entraînement à la vapeur d'eau dans le vide. *Bull. Sci. Pharmacol.*, **39**, 607-614.

BONNER J., 1950. *Plant Biochemistry*. Acad. Press., New York.

BRUNEL A., 1949. *Traité pratique de chimie végétale*, t. 2, Georges Frère, Tourcoing (Nord).

DEDONDER R., 1952. *Les glucides du topinambour. Contribution à l'étude de leur structure et de leur biochimie*. Thèse Doc. Sci. Nat. Paris.

DUMAZERT C., MARCELET Y., 1938. Sur un nouveau catalyseur de minéralisation. *Bull. Soc. Chim. biol.*, **20**, 201-212.

FAUCONNEAU G., JARRIGE R., 1955. Quelques problèmes physiologiques de l'utilisation des fourrages. *C. R. des 5 journées d'étude de la F. E. Z.*, Publ. nº 6, F. E. Z.

GAUSSÈRES B., 1965. Étude des variations des teneurs en glucides cytoplasmiques et membranaires du Dactyle au cours de l'année. *Ann. Biol. anim. Biochim. Biophys.*, **5**, 361-381.

JARRIGE R., 1961. Analyse des constituants glucidiques des plantes fourragères I. Fractionnement des membranes par les hydrolyses acides. *Ann. Biol. anim. Biochim. Biophys.*, **1**, 162-212.

LEFEBVRE J. M., 1958. *Étude des variations des substances azotées au cours de la végétation de l'Orge*. Thèse Doc. Université de Paris.

LIORET Cl., 1958. *Recherches sur le métabolisme de deux tissus végétaux cultivés* in vitro. Thèse Doc. Sci. nat. Paris.

LUGG J. W. H., 1939. The representativeness of extracted samples and the efficiency of extraction of proteine from the fresh leaves of plants and some partial analyses of the whole proteins of leaves. *Biochem. J.*, **33**, 110-122.

MOYSE A., 1950. *Respiration et métabolisme azoté* (*Étude de physiologie foliaire*). Hermann et Cie, Éd. Paris.

NOWAKOWSKI T. Z., CUNNINGHAM R. K., NIELSEN K. F., 1965. Nitrogen fractions and soluble carbohydrates in *Italian Ryegrass*. I. Effects of soil temperature, form and level of Nitrogen. *J. Sci. Food. Agric.*, **16**, 124-134.

SOMOGYI M., 1952. Notes on sugar determination. *J. biol. Chem.*, **195**, 19-23.

VICKERY H. B., PUCHER G. W., CLARK H. E., CHIBNALL A. C., WESTALL R. G., 1935. The determination of glutamine in the presence of asparagine. *Biochem. J.*, **29**, 2710-2720.

Ann. agron., 1967, **18** (5), 545-569.

PRÉSENCE D'ACIDES PHÉNOLS LIBRES DANS LE SOL. ÉTUDE DE LEUR INFLUENCE SUR LA GERMINATION ET LA CROISSANCE DES VÉGÉTAUX (1)

J.-R. HENNEQUIN et C. JUSTE
avec la collaboration technique de M. LASSERRE

Laboratoire de Microbiologie des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles ;
Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Ouest, 33 - Pont-de-la-Maye
Institut national de la Recherche agronomique

INTRODUCTION

L'addition de matière organique dans les sols est susceptible d'en améliorer la fertilité de différentes façons.

Selon WHITEHEAD (1963) deux modes d'action prédominent :

— l'apport d'éléments nutritifs minéraux, libérés par la matière organique elle-même au cours de son évolution ;

— l'amélioration des conditions physiques du sol.

Viennent ensuite des effets complémentaires, d'importance relative très variable, et classés par cet auteur en trois groupes :

— action sur la mobilité des éléments minéraux ayant une autre origine que la matière organique elle-même ;

— action directe de composés organiques actifs sur le développement et la croissance végétale ;

— intervention sur le développement de certains parasites des végétaux.

Le présent travail concerne plus particulièrement l'étude de l'action stimulante ou inhibitrice de composés organiques du sol sur la croissance des végétaux.

Plusieurs mises au point relatives à cette question ont paru ces dernières années, mettant tour à tour en lumière ses divers aspects.

PAULI (1961) et CHAMINADE (1966) envisagent les effets des « substances humiques » sur la physiologie des plantes.

(1) Travail réalisé dans le cadre du Groupe de Recherche : « Biochimie appliquée », animé par H. BLACHÈRE.

FLAIG (1966) étudie plus spécialement les produits de décomposition de la lignine. BORNER (1960) et WOODS (1960) insistent sur la libération par les plantes de substances organiques et sur la signification écologique de ce phénomène. Enfin PATRICK et coll. (1964), McCALLA et HASKINS (1964) examinent l'effet phytotoxique des produits de décomposition des résidus de récolte.

Une façon d'aborder le sujet pourrait consister à rechercher dans le sol (ou dans des fractions du sol), des composés dotés d'activité sur la physiologie des plantes, et ceci sans aucun préjugé quant à leur nature chimique.

Mais cette méthode est difficilement applicable à cause de l'absence de test biologique suffisamment maniable pour permettre le développement des procédés classiques de séparation et de purification.

Il semble donc préférable de tenter la mise en évidence du rôle de substances chimiquement définies, choisies « *a priori* » parce que l'on peut présumer de leur activité.

De ce point de vue les acides phénols retiennent l'attention à double titre : d'une part, existant en abondance dans le règne végétal, ils ont des chances d'apparaître dans le sol, à l'état libre, au cours des processus de transformation de la matière organique, et d'autre part, on leur connaît plusieurs types d'action sur la physiologie des végétaux.

I. — ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. *Les acides phénols libres du sol*

Par acides phénols « libres » du sol, on entend les formes monomères de ces acides présentes dans le sol. Compte tenu de la solubilité généralement assez faible de ces composés dans l'eau, les techniques faisant appel à cet agent d'extraction ne permettent d'obtenir que des quantités faibles de produits. JACQUIN et BRUCKERT (1965) puis BRUCKERT (1966) ont cependant mis en évidence dans des extraits aqueux de sol divers acides aromatiques dont l'acide para-hydroxybenzoïque et l'acide vanillique.

La plupart des auteurs extraient les acides phénols du sol en utilisant des réactifs alcalins à la température du laboratoire. C'est ainsi que WHITEHEAD (1964) puis MARTINEZ et DEPETRE (1965) ont pu montrer la présence assez constante dans quelques types de sols, des acides para-hydroxybenzoïque, vanillique, para-coumarique et férulique, en utilisant le mélange CaO-H_2O (1 g-100 ml). Le tableau 1 donne les résultats trouvés par WHITEHEAD.

GUENZI et McCALLA (1966 *a*) retrouvent les mêmes acides, plus des traces d'acide syringique, par extraction à la soude 2 N, d'échantillons de sol provenant de parcelles ayant subi des façons culturales différentes (tabl. 2).

Les mêmes auteurs observent en outre que l'utilisation d'autres agents d'extraction tels que : $Na_4P_2O_7$ 0,1 M, HCl 2 N, CaO, Méthanol, ne permettent d'obtenir que des traces d'acides phénols (moins de 1 p.p.m).

Il est vraisemblable que les agents alcalins ne solubilisent pas seulement les acides phénols « libres » tels qu'on les a définis plus haut, mais provoquent aussi, par saponification à froid, l'apparition de monomères antérieurement associés à d'autres substances par des liaisons de type ester (RIBÉREAU-GAYON, 1964).

Il est nécessaire de tenir compte de ces formes liées dans la mesure où elles constituent sans doute une partie importante du stock des acides phénols dans le sol, où des mécanismes d'hydrolyse peuvent apparaître au cours de l'évolution de la matière organique (GUENZI et MCCALLA, 1966 *a*).

D'où une extension du terme « acides phénols libres ».

TABLEAU 1

Acides phénols trouvés dans divers types de sol
(d'après WHITEHEAD, 1964)

Nom	Teneur du sol en p.p.m du poids sec	Molarité dans la solution du sol
p-OH benzoïque	0,3 à 2,3	$0{,}8 \cdot 10^{-5}$ à $3{,}9 \cdot 10^{-5}$ M
Vanillique	0,3 à 2,2	$0{,}7 \cdot 10^{-5}$ à $4{,}9 \cdot 10^{-5}$ M
p-coumarique	0,4 à 3,1	$0{,}9 \cdot 10^{-5}$ à $4{,}2 \cdot 10^{-5}$ M
Férulique	0,1 à 3,1	$0{,}07 \cdot 10^{-5}$ à $3{,}2 \cdot 10^{-5}$ M

TABLEAU 2

Concentrations en acides phénols (p.p.m. du poids sec) dans deux parcelles
(d'après GUENZI et MCCALLA, 1966 *a*)

Nom	Sol ayant subi des façons superficielles	Sol labouré
p-OH benzoïque	1,2 ± 0,3	1,3 ± 0,1
Vanillique	1,5 ± 0,7	1,5 ± 0,5
p-coumarique	14,4 ± 2,3	9,4 ± 2,9
Férulique	7,6 ± 4,0	3,7 ± 1,5
Syringique	< 1 p.p.m	< 1 p.p.m

2. *Activité physiologique des acides phénols*

L'activité des composés phénoliques sur la physiologie animale et végétale a fait, depuis une dizaine d'années, l'objet de travaux fort nombreux (voir à ce sujet HARBORNE, 1964).

Nous allons résumer les principaux mécanismes d'action connus ou à l'étude concernant spécialement les acides phénols. Ces derniers se sont révélés actifs dans plusieurs domaines :

a) germination et croissance des végétaux.

b) Agents capables de contrôler le développement de certains champignons phytopathogènes.

c) Processus liés à la respiration.

d) Synergistes ou inhibiteurs de phytohormones.

Nous examinerons successivement ces divers aspects.

a) *Action des acides phénols sur la germination et la croissance.*

Dans une étude assez ancienne, EVENARI (1949) avait montré quelques relations entre la structure chimique des acides phénols et leur activité sur la germination :

— diminution de l'effet inhibiteur lorsque le nombre d'OH croît ;

— diminution de l'effet inhibiteur lorsque le nombre de COOH croît ;

— augmentation de l'effet inhibiteur par halogénation du noyau aromatique, ou en présence d'une double liaison sur une chaîne latérale.

MAYER et EVENARI (1953) ont comparé plusieurs acides à la coumarine dans l'inhibition de germination de la laitue.

Ils ont corrigé ou précisé les résultats précédents.

— Il y a peu de relations entre la structure et l'activité, en particulier la double liaison sur la chaîne qui porte le COOH n'augmente pas le pouvoir inhibiteur.

— L'introduction d'un groupe aminé fait disparaître l'activité.

— Les sels sont beaucoup moins actifs que les acides correspondants.

— Pour les esters, on ne peut pas donner de règle générale.

MASSART (1957) a isolé des glomérules de betterave, les acides para-hydroxybenzoïque, vanillique, férulique et para-coumarique, et a montré qu'ils pouvaient inhiber la germination de *Lepidium sativum* entre $5 \cdot 10^{-5}$ et $5 \cdot 10^{-3}$ M.

Plus récemment, HATSUDA (1965) a étudié l'inhibition de la germination et des plantules par les acides salicylique, vanillique et para-coumarique sur 14 espèces. Il montre que celles-ci ont des sensibilités très différentes vis-à-vis des agents inhibiteurs.

Sur les plantules, BORNER (1960) a obtenu une inhibition du développement des racines de seigle et de blé dans des solutions contenant 10 p.p.m. d'acide para-hydroxybenzoïque, férulique, vanillique ou para-coumarique (effet dépressif de 20 à 30 p. 100).

FLAIG (1965) considère que les acides phénols provenant de la dégradation de la lignine peuvent être activateurs de la croissance aux faibles concentrations (10^{-4} à 10^{-8} M soit environ 10 à 10^{-1} p.p.m.) et inhibiteurs aux fortes concentrations (plus de 10^{-3} M).

Récemment GUENZI et MCCALLA (1966 *b*) ont extrait les acides phénols de résidus de céréales et testé leur phytotoxicité sur des plantules de blé entre 600 et 5 000 p.p.m.

Ils trouvent peu d'effet sur la germination mais une inhibition nette du développement de la plantule pour cette zone de concentrations.

b) *Action sur les champignons phytopathogènes.*

Plusieurs auteurs ont cherché parmi les composés phénoliques les agents permettant d'expliquer, chez certaines variétés, la résistance à des parasites fongiques.

Ainsi VAN SUMERE (1957, 1960) a montré l'existence d'une action inhibitrice, très marquée pour les acides para-hydroxybenzoïque et férulique, légère pour les acides caféïque et vanillique, sur la germination des spores de *Puccinia graminis*. Mais les acides ortho-coumarique et protocatéchique peuvent stimuler cette germination.

FLOOD et KIRKHAM (1960) citent les résultats obtenus sur la croissance et la sporulation de *Venturia inaequalis* et *V. pirina* : les acides phénols dont seul un —OH en *para* est libre, sont peu actifs (para-coumarique, férulique) les autres sont toxiques pour le parasite (caféïque, protocatéchique, ortho-coumarique).

WILLIAMS (1963) sur *Sclerotinia fructigena* donne des résultats d'inhibition de germination des spores qui concordent avec les précédents.

c) *Action sur divers processus du métabolisme.*

L'activité des acides phénols sur la respiration a pu être démontrée : ROUBAIX et LAZAR (1960) ont établi qu'au cours de la respiration des glomérules de betterave, l'acide férulique retarde l'absorption d'oxygène tandis que les acides para-hydroxybenzoïque, vanillique et para-coumarique stimulent la décarboxylase. NAGUIB (1962) a étudié l'influence des acides hydroxybenzoïques sur la respiration des feuilles d'orge, montrant notamment un effet de ces acides sur l'absorption et la dégradation des glucides. MAYER (1963) a montré avec l'acide chlorogénique, que le système phénol-phénolase dans les mitochondries de laitue, peut entrer en compétition avec la chaîne des cytochromes, par exemple au stade de l'oxydation de NADH.

FLAIG (1965) et ses collaborateurs ont émis une hypothèse selon laquelle les composés de dégradation de la lignine interviennent comme agents découpleurs des phosphorylations oxydatives ; ils ont apporté à l'appui de cette hypothèse plusieurs confirmations expérimentales.

d) *Interactions des acides phénols avec les phytohormones.*

L'étude des interactions entre les composés phénoliques et les phytohormones, particulièrement les auxines, a fait l'objet de nombreux travaux. Nous résumerons ici les résultats obtenus par des auteurs qui ont travaillé spécialement sur les acides phénols.

D'une part, une action directe sur la formation d'acide indol-β-acétique (AIA) a été établie : GORDON et PALEG (1961) ont rapporté une augmentation de la synthèse d'AIA à partir du tryptophane en présence d'acide protocatéchique, caféïque ou chlorogénique.

D'autre part, de nombreux auteurs ont recherché l'influence des acides phénols sur les systèmes enzymatiques responsables de la dégradation de l'AIA.

GORTNER et KENT (1958) ont établi que l'acide para-coumarique et le quinyl-para-coumarate sont des coenzymes de l'AIA-oxydase de l'ananas, tandis que l'acide férulique l'inhibe fortement.

ZENK et MULLER (1963) montrent, dans une étude *in vivo*, l'effet de plusieurs acides phénols sur l'AIA-décarboxylase.

Le tableau 3 résume les résultats obtenus par ces auteurs.

De même TOMASZEWSKI (1964), s'appuyant sur plusieurs tests biologiques, et en examinant différentes concentrations en acides phénols, a pu établir que d'une façon générale :

— les monophénols stimulent l'AIA décarboxylase à faible concentration, mais l'inhibent à forte concentration ;

— les polyphénols inhibent en général le système enzymatique.

Le tableau 4 illustre ces conclusions.

PILET (1964, 1966) et PILET et GASPAR (1965) ont montré que l'acide chlorogénique inhibe de façon compétitive l'AIA-oxydase extraite des racines de *Lens culinaris*, et corrélativement provoque une augmentation du niveau endogène de l'AIA.

L'acide para-hydroxybenzoïque a un effet opposé, et les acides ortho- et méta-hydroxybenzoïques sont peu actifs.

TABLEAU 3

Décarboxylation enzymatique de l'AIA en p. 100 du témoin (acides phénols à 10^{-4} M)

(d'après ZENK et MULLER, 1963)

Témoin	100	Phlorétique	188
Chlorogénique	73	para-hydroxybenzoïque	113
Caféïque	79	Férulique	126
Sinapique	83	Isoférulique	101
para-coumarique	181	Cinnamique	100
ortho-coumarique	104	Tyrosine	100
méta-coumarique	117		

TABLEAU 4

Influence de divers acides phénols sur l'oxydation d'AIA par l'AIA oxydase du coléoptile d'avoine

(d'après TOMASZEWSKI, 1964)

	Concentrations molaires ayant pour effet :	
	Décarboxylation de 50 p. 100 de l'AIA total obtenue en 20 mn (activation) (1)	Diminution de 50 p. 100 de la décarboxylation de AIA (20 mn) obtenue en présence de $2 \cdot 10^{-5}$ M d'acide para-coumarique (inhibition) (1)
para-hydroxybenzoïque	10^{-3} M	0
para-coumarique	$2 \cdot 10^{-5}$ M	$2 \cdot 10^{-4}$ M
Vanillique	10^{-4} M	$4 \cdot 10^{-4}$ M
Férulique		$4 \cdot 10^{-6}$ M
Sinapique		$4 \cdot 10^{-6}$ M
Caféïque		$2 \cdot 10^{-6}$ M
Chlorogénique		$1 \cdot 10^{-6}$ M
Gentisique		$1 \cdot 10^{-6}$ M

(1) Le mélange réactionnel contient : solution d'enzyme dans un tampon phosphate 0,05 M (pH 5,9) ; $MnCl_2$ 10^{-4} M ; AIA 20 µg/ml.

D'autres auteurs ont cherché les effets de synergisme ou d'inhibition au niveau d'un test de croissance : ainsi THIMANN et coll. (1962) ont établi le synergisme de l'acide caféïque avec l'AIA endogène, sur le coléoptile d'avoine.

NITSCH et NITSCH (1962) ont donné une étude très complète sur le test mésocotyle, ils en déduisent un certain nombre de relations entre structure et activité.

D'après ces auteurs :

a) les monophénols inhibent la croissance produite par AIA (acides hydroxybenzoïques et coumariques) ;

b) les ortho-diphénols ont des effets synergiques (acide protocatéchique, caféïque) ;

c) les méta-diphénols sont inhibiteurs ;

d) les polyphénols sont synergistes (acide gallique) ;

e) la méthoxylation abolit l'effet synergique (acide férulique).

L'interaction des acides phénols avec les gibbérellines a aussi été recherchée. NITSCH et NITSCH (1961) ont trouvé une synergie assez faible des acides méta- et para-coumarique avec l'acide gibbérellique (A_3) sur le test mésocotyle.

Nous avons obtenu des résultats analogues (non publiés) sur le test pois nain (*Lathyrus odoratus*) avec l'acide para-coumarique. DUMITRU et VERBEEK (1964) ont étudié l'interaction de l'acide férulique avec A_3 sur la germination de l'orge et la formation de l'α-amylase. Ils montrent un antagonisme entre ces deux composés.

Enfin LEE et SKOOG (1965) travaillant sur cultures de tissu de tabac, ont montré que l'induction de bourgeons sur ces tissus pouvait être contrôlée par la chaîne suivante :

Acide phénol → niveau d'AIA → efficacité de la Kinétine → bourgeonnement.

Ainsi l'action inhibitrice ou stimulante des acides phénols sur le développement des végétaux est assez bien établie, du moins en ce qui concerne les premiers stades de ce développement.

Il paraît donc utile de se faire une idée aussi précise que possible de la nature et de la concentration des acides phénols que l'on peut rencontrer à l'état libre dans les sols.

Le but de ce travail sera donc de procéder à un inventaire systématique des acides phénols extraits de sols représentant des unités pédologiques bien définies et d'approfondir l'étude de l'activité de ces composés sur la germination et la croissance des végétaux, si possible jusqu'à un stade avancé de celle-ci.

II. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

1. *Acides phénols libres dans quelques types de sol*

Technique expérimentale.

50 g de terre séchée à l'air et tamisée à 2 mm sont agités pendant deux heures en présence de 75 ml de soude 0,2 N. La suspension est centrifugée 5 minutes à 4 000 t/mn, filtrée puis acidifiée à pH 1 par addition de HCl concentré. Après une nuit de repos la fraction humique précipitée est séparée par centrifugation, et le surnageant est ensuite filtré.

Les acides phénols sont extraits par agitation de 50 ml du filtrat précédent (fraction fulvique) en présence de 50 ml d'éther. L'extrait éthéré est concentré à sec sous vide et le résidu est repris par 0,75 ou 1 ml d'éthanol. On a vérifié qu'une deuxième extraction à l'éther ne permet pas d'obtenir de quantités supplémentaires d'acides phénols.

La solution alcoolique est chromatographiée sur couche mince de cellulose (250 μ) pendant deux heures, l'éluant étant constitué par une solution aqueuse à 2 p. 100 d'acide acétique. On dépose des fractions de 10 μl de solution alcoolique. La révélation est effectuée à la para-nitroaniline diazotée.

Les caractéristiques chromatographiques de quelques corps de référence sont donnés au tableau 5.

TABLEAU 5

Caractéristiques chromatographiques de quelques acides phénols

Acides phénols		A	B	C Rf	D *p*-nitroaniline diazotée	E ac. sulfanilique diazoté
Dérivés de l'acide benzoïque						
2-OH-Benzoïque	Salicylique	+		65	Br. clair 705	J. 290
4-OH-Benzoïque	para-hydroxybenz.	+	+	58	R. 84	J. 256
4-MeO-Benzoïque	Anisique			56	Traces roses	Traces
2-4-diOH-Benz.	β-Résorcylique	+		47	Br. 695	J. à G. 258-233
2-5-diOH-Benz.	Gentisique	+		59	Br. 180	G. 233
2-6-diOH-Benz.	γ-Résorcylique			74	Br. 193	Ve. 223
3-4-diOH-Benz.	Protocatéchique	+	+	46	Bl. 524	R. 149
3-5-diOH-Benz.	α-Résorcylique	+		46	O. 196	J. 288 + O. 204
3-MeO-4OH-Benz.	Vanillique	+	+	51	Vi. 618	O. 182
3-4-5-triOH-Benz.	Gallique			34	Br. 180	G. 233
3-5-di-MeO-4OH-benzoïque	Syringique	+	+	46	G.-Ve. 250	O. 184
Dérivés de l'acide cinnamique						
2-OH-Cinnamique	ortho-coumarique	+		41-70	R. Vi. 8	O. 182
4-OH-Cinnamique	para-coumarique	+	+	36-68	Bl. Vi. 561	R. 33
3-4-diOH-Cinnam.	Caféïque	+		24-55	G. 233	G. 233
3MeO-4OH-Cinnam	Férulique	+	+	29-57	Br. 705 à Ve. 430	J. 190 à Vi. 665
3-5MeO-4OH-Cinn.	Sinapique	+		24-51	G. 233	Br. 704
3-Caféoyl-Quinique	Chlorogénique	+		51-72	Br. 180	G 233

A = Composés signalés comme constituants des plantes par IBRAHIM et TOWERS (1960).
B = Composés rencontrés au cours de la dégradation de la lignine (SCHUBERT, 1965).
C = Rf sur couche mince de cellulose (Macherey-Nagel MN 300) après migration du solvant : acide acétique 2 p. 100 dans l'eau.
Les acides cinnamiques donnent deux taches par isomérie *cis-trans*.
D-E = Couleurs obtenues après pulvérisation des réactifs indiqués (JACQUIN, 1963).

Bl. bleu	J. jaune	Vi. violet
Br. brun	O. orangé	Ve. vert
G. gris	R. rouge	

et numéro de code dans le *Code universel des couleurs*. Lechevalier, éd., Paris.

Les quantités des acides ainsi séparés sont évaluées au densitomètre intégrateur par comparaison avec une gamme étalon préparée avec des acides purs d'origine commerciale. (Gamme 2,5 — 5 — 10 γ).

Types de sols étudiés.

a) Sols caractérisant des unités pédologiques bien définies du Sud-Ouest atlantique.

Les déterminations ont été effectuées dans des échantillons provenant de chaque horizon de profils caractéristiques des unités pédologiques suivantes :

$P_1P_2P_3$: Podzol humoferrugineux développé sur sables des Landes.

P_4P_5 : Podzol humique hydromorphe développé sur sables des Landes.

T_1 : Sol brun acide (sol de « Touya » formé sur le flysch crétacé ; Basses-Pyrénées).

T_2 : Sol brun acide (sol de « Touya » formé sur alluvions anciennes du Quaternaire ; Basses-Pyrénées).

R : Ranker (Saint-Jean-Pied-de-Port ; Basses-Pyrénées).

C_1 et C_2 : Rendzines (Sols de Champagne ; Charentes).

TABLEAU 6

Acides phénols libres dans quelques types de sols caractérisant des unités pédologiques bien définies

Type de sol	Profondeur en cm	Horizon	Teneur en carbone (‰)	Observations	Acides identifiés en mg/k de sol sec		
					p- coumarique	Vanillique	*p*-hydroxybenzoïque
P_1 Podzol (sable des Landes)	0-8	Litière	33		6,3	6,5	5,1
	45-80	A_2	0,3	traînées	—	2,4	—
	80-130	B_1	7,3	brunes	—	2,9	—
P_2 Podzol (sable des Landes)	0-5	Litière	58		—	5,9	5,2
	5-30	A_2	4,2	traînées	4,7	4,8	3,4
	30-90	B_1	6,3	brunes	—	3,9	3,4
P_3 Podzol (sable des Landes)	0-5	Litière		traînées	6,2	4,4	4,7
	60-120	B_1		brunes	tr.	faibles tr.	—
P_4 Podzol humique hydromorphe (sable des Landes)	0-5	Litière			5,8	5,6	—
	5-35	A_1			3,9	3,4	—
	35-50	A_2			3,1	2,9	—
	50-80	B_1			3,4	2,6	—
P_5 Podzol humique hydromorphe (sable des Landes)	0-2	Litière	99		6,1	5,9	7,3
	2-20	A_1	30	traînées	5,5	4,3	4,2
	20-50	B_1	19	brunes	—	3,5	3,8
T_1 Sol brun acide	0-2	Litière	93		5,3	3,8	4,4
	2-20	A_{11}	36,3		—	2,9	2,9
	20-50	A_{12}	—		—	2,5	2,6
T_2 Sol brun acide	2-20	Litière	84,7		—	3,5	4,0
	20-40	A_{11}	48,7		—	tr.	3,4
	40-80	A_{12}	32,6		—	—	tr.
C_1 Rendzine	0-10				5,3	3,9	3,2
C_2 Rendzine	0-10		28		4,9	2,6	2,6
R Ranker	0-10				—	2,6	3,1

b) Sols ayant reçu des amendements organiques de natures diverses à doses massives.

Ces sols proviennent d'un champ d'expérience établi en 1960 sur un ancien sol de vigne (sol de Graves) originellement très pauvre en matière organique. Ce champ, qui est maintenu en jachère permanente, reçoit chaque année au mois de janvier des apports massifs de matières organiques d'origines diverses.

La détermination des acides phénols a été faite sur des échantillons prélevés en novembre 1965 dans les parcelles qui ont reçu systématiquement soit du fumier de ferme (apports cumulés équivalents à 350 t/ha de matière fraîche au moment du prélèvement) soit des tiges de maïs (apports cumulés équivalents à 300 t/ha de matière fraîche au moment du prélèvement), ainsi que dans les parcelles témoins qui n'ont pas reçu d'amendement organique.

Résultats et discussion.

Dans la plupart des horizons des profils inventoriés (tabl. 6), on retrouve de manière à peu près constante la présence d'acide vanillique et d'acide para-hydroxybenzoïque à des concentrations du même ordre de grandeur que celles mesurées par d'autres auteurs (WHITEHEAD, 1964 ; JACQUIN et BRUCKERT, 1965 ; GUENZI et MCCALLA, 1966 *a* ; BRUCKERT 1966), et cela bien que les réactifs d'extraction utilisés ne soient pas les mêmes (CaO, eau, NaOH 2 N).

Les teneurs les plus importantes en acides phénols se rencontrent dans les horizons de surface, et notamment dans les litières, mais les concentrations sont encore très élevées dans les horizons sous-jacents, pourtant beaucoup moins riches en carbone total.

TABLEAU 7

Acides phénols libres dans un sol ayant reçu différents amendements organiques à doses massives

Parcelles (1)	Teneur en carbone (‰)	Acides phénols identifiés					
		p-coumarique		Vanillique		*p*-hydroxybenzoïque	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
T_1	4,2	tr.	—	2,4	0,57	3,1	0,74
T_2	4,2	—	—	2,2	0,52	2,8	0,67
F_1	8,9	4,9	0,55	3,7	0,42	3,4	0,38
F_2	8,9	4,5	0,51	3,5	0,39	3,7	0,42
M_1	6,1	6,8	1,11	3,5	0,57	3,3	0,54
M_2	6,1	6,6	1,08	3,1	0,51	3,2	0,52

(1) T : Parcelles témoins.
F : Parcelles ayant reçu 350 t/ha de fumier avant le moment du prélèvement des échantillons de sol.
M : Parcelles ayant reçu 300 t/ha de tiges de maïs avant le moment du prélèvement des échantillons de sol.
(1) : En mg par kilo de terre séchée.
(2) : En mg par g de carbone total.

Dans les horizons illuviaux de podzols la chromatographie est fortement perturbée par la présence de traînées brunes dues vraisemblablement à l'existence de composés polyphénoliques colorés, solubles en milieu acide (fraction fulvique) et qui passent dans l'éther au moment de l'extraction.

La présence de l'acide para-coumarique est moins systématique : on rencontre cet acide surtout dans les litières et dans l'ensemble des horizons des podzols hydromorphes. Ce dernier point paraît important et est en accord avec les résultats obtenus par JACQUIN et BRUCKERT (1965) : augmentation du taux des acides extractibles à l'eau dans une litière forestière évoluant en conditions d'anaérobiose expérimentale.

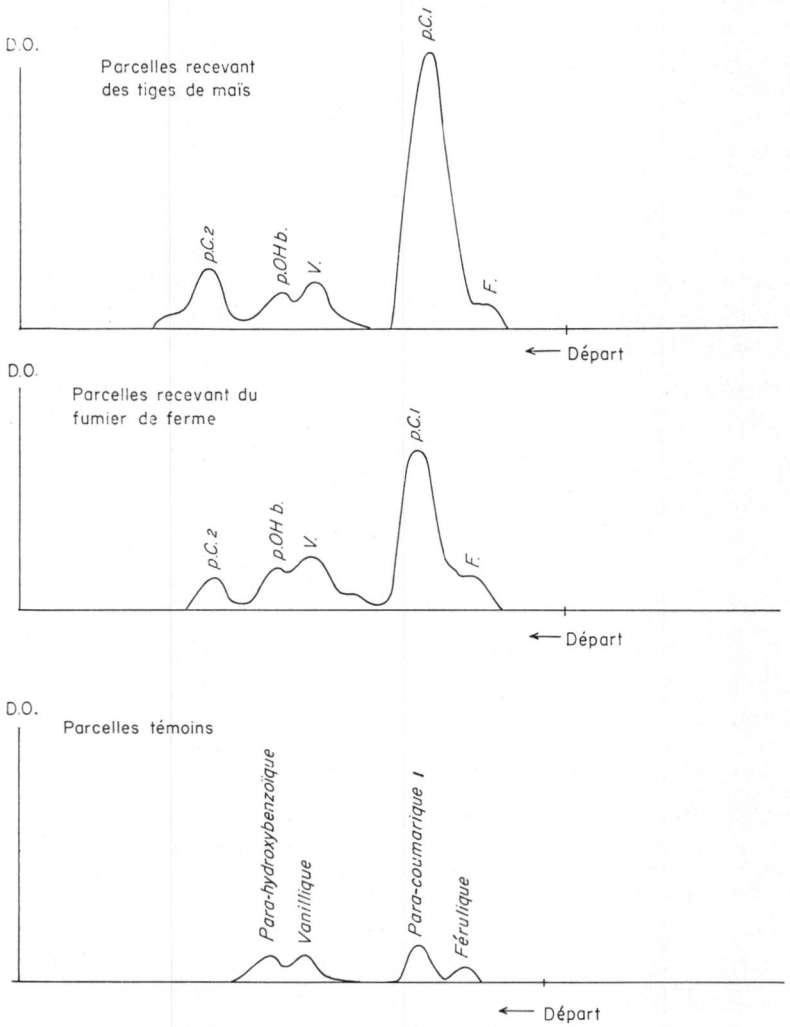


FIG. 1. — *Enregistrements densitométriques des chromotogrammes d'acides phénols extraits de sols ayant reçu divers amendements organiques.*

*p*C1, *p*C2 : ac. para-coumarique (isomères).
*p*OH : ac. para-hydroxybenzoïque.
V : ac. vanillique.
F : ac. férulique.

Il confirme aussi les observations de GUENZI et MCCALLA (1966 *a*) : présence d'acides phénols libres (para-coumarique, férulique) en quantité moindre dans un sol labouré profondément que dans un sol soumis uniquement à des façons superficielles (donc moins aéré en profondeur dans ce dernier cas).

Dans les sols qui ont reçu des amendements organiques à doses massives (tabl. 7), on observe, corrélativement à l'augmentation du taux de carbone, une augmentation très nette du taux des acides para-coumarique, vanillique, para-hydroxybenzoïque ; on remarque également que les parcelles dans lesquelles on a enfoui des tiges de maïs sont beaucoup plus riches en acide para-coumarique (fig. 1), que celles qui ont reçu du fumier, et cela bien que la quantité totale de carbone apportée par le fumier soit nettement supérieure à celle apportée par les tiges de maïs. Il y a donc une influence spécifique des débris végétaux du maïs sur l'augmentation de la teneur en acide para-coumarique du sol. Ce résultat est confirmé par un travail récent de GUENZI et MCCALLA (1966 *b*) concernant la présence de quantités notables de cet acide dans les résidus de récolte de maïs et sorgho.

2. *Influence de divers acides phénols sur la germination et le développement de plantules*

Le but de cet essai est de comparer entre elles les activités de divers acides phénols vis-à-vis d'une espèce donnée, ou les sensibilités de différentes espèces pour un acide donné.

Matériel et Méthodes.

Les huit espèces végétales suivantes ont été étudiées.

Tomate	(*Solanum lycopersicum*).
Ray-Grass	(*Lolium perenne*).
Luzerne	(*Medicago sativa*).
Trèfle	(*Trifolium pratense*).
Cresson	(*Lepidium sativum*).
Colza	(*Brassica napus*).
Blé	(*Triticum sativum*).
Maïs	(*Zea maïs*).

Les graines sont stérilisées en surface selon STOTZKY et coll. (1962).

Milieu de germination.

Différents milieux ont été essayés et comparés :

— eau ou tampons phosphates liquides en boîtes de Petri (diamètre 10 cm) ;
— eau ou tampons gélosés à 5 g/litre, en boîtes de Petri ;
— papier-filtre imbibé d'eau ou de tampons ;
— sable imbibé d'eau ou de tampons.

La germination et la croissance sont toujours moins régulières en milieu liquide que sur support solide.

Sur papier ou sur sable, il est difficile de prélever les racines pour des mesures d'allongement ou des pesées.

Seuls les milieux gélosés permettent de vérifier la stérilité. Enfin en accord avec MAYER et EVENARI (1953), nous avons constaté que l'emploi des solutions tamponnées n'était pas justifié.

En conséquence, le milieu adopté est l'eau gélosée à 5 g/l, coulée par 25 ml en boîtes de Petri de diamètre 10 cm.

Acides phénols.

L'activité de cinq acides phénols, a été recherchée : para-hydroxybenzoïque (Prolabo), para-coumarique, férulique, vanillique, caféïque (Fluka AG).

En outre, nous avons comparé l'activité de ces corps à la coumarine (Prolabo) qui est un inhibiteur de germination bien connu (voir à ce sujet MAYER et EVENARI, 1953, par exemple).

Ces composés ont été stérilisées en solution par filtration sur membrane (Millipore) et incorporés à l'eau gélosée en surfusion.

Déroulement de l'essai.

Les graines stérilisées sont mises à germer à l'obscurité à 22°C pendant 3 à 4 jours (200 graines par traitement, 10 à 25 par boîte).

Le nombre de graines inhibées est rapporté à un témoin (eau gélosée pure).

La croissance des plantules a été appréciée par pesée, en poids frais.

Résultats et discussion.

Les sensibilités des différentes espèces et l'activité des différents acides phénols sont caractérisées, pour un couple déterminé graine-acide, par la concentration (en p.p.m), entraînant 50 p. 100 d'inhibition par rapport au témoin. Le tableau 8 donne la molarité correspondant à 100 p.p.m. des divers composés.

Les seuils d'inhibition (50 p. 100) figurent aux tableaux 9 (germination) et 10 (plantules).

TABLEAU 8

Molarité des solutions à 100 p.p.m. des six substances étudiées

Composé	Poids moléculaire	Molarité d'une solution à 100 p.p.m
Ac. para-hydroxybenzoïque	138,13	$7{,}2 \cdot 10^{-4}$ M
Ac. para-coumarique	164,16	$6{,}1 \cdot 10^{-4}$ M
Ac. férulique	194,18	$5{,}1 \cdot 10^{-4}$ M
Ac. caféique	180,15	$5{,}5 \cdot 10^{-4}$ M
Ac. vanillique	168,14	$5{,}9 \cdot 10^{-4}$ M
Coumarine	146,14	$6{,}8 \cdot 10^{-4}$ M

TABLEAU 9

Concentrations (en p.p.m.) de 5 acides phénols (1) *causant une inhibition de 50 p. 100 de la germination*

	*p*C	*p*OHb	F	C	V
Ray-Grass	150	450	400	300	400
Tomate	200	450	300	600	1 000
Trèfle	450	400	500	800	800
Cresson	300	450	500	> 1 000	> 1 000
Luzerne	450	450	1 000	> 1 000	> 1 000
Colza	600	600	1 000	> 1 000	> 1 000
Blé Maïs	> 1 000				

(1) *p*C = para-coumarique.
*p*OHb = para-hydroxybenzoïque.
V = vanillique.
F = férulique.
C = caféique.

Compte tenu de la variabilité propre du matériel végétal, les valeurs indiquées sont établies à 100 p.p.m. près.

Cette précision est d'ailleurs suffisante pour mettre en évidence des différences de sensibilité entre espèces, et de toxicité entre acides phénols.

TABLEAU 10

Concentrations en (p.p.m.) de 5 acides phénols (1) *causant une inhibition de 50 p. 100 du développement des plantules*

	*p*C	V	F	*p*OHb	C
Tomate	150	200	200	450	300
Trèfle	200	200	250	450	450
Colza	300	100	250	450	500
Ray-Grass	150	300	400	450	450
Luzerne	150	200	450	450	550
Maïs	250	600	200	500	450
Cresson	300	400	450	400	500
Blé	400	400	400	400	600

(1) Abréviations comme au tableau 9.

On remarque ainsi que :

— le classement des sensibilités des diverses espèces est relativement constant, quel que soit l'acide phénol utilisé.

Les petites graines (tomate, ray-grass) sont pratiquement toujours plus sensibles que les grosses (blé, maïs). Et cet effet reste visible sur les jeunes plantules.

— de même les toxicités des cinq agents étudiés se retrouvent classées dans le même ordre, pratiquement vis-à-vis de toutes les espèces végétales.

TABLEAU 11

Sensibilités des différentes espèces végétales
(indices de classement définis dans le texte)

Germination		Développement de la plantule	
Ray-grass	340	Tomate	260
Tomate	510	Trèfle	310
Trèfle	590	Colza	320
Cresson	650	Ray-grass	350
Luzerne	780	Luzerne	360
Colza	840	Maïs	400
Blé	> 1 000	Cresson	410
Maïs	> 1 000	Blé	440

Ces deux remarques justifient l'établissement d'un classement. Dans le cas présent nous avons choisi comme indice la moyenne par plante ou par acide des seuils (50 p. 100) définis ci-dessus (tabl. 11 et 12).

(Notons qu'il s'agit d'indices arbitraires, et que leur expression en p.p.m. n'aurait pas de sens).

TABLEAU 12

Toxicité des différents acides phénols étudiés (1)
(indices de classement définis dans le texte)

Germination		Développement de la plantule	
*p*C	512	*p*C	237
*p*OHb	606	V	300
F	712	F	325
C	837	*p*OHb	443
V	900	C	475

(1) Abréviations cf. tableau 9.

Les tableaux 9 et 10 montrent que les acides phénols sont des inhibiteurs plus actifs vis-à-vis de la croissance des jeunes plantules que vis-à-vis de la germination : le cas de l'acide vanillique est particulièrement net à cet égard.

De plus, la sensibilité des différentes plantules se manifeste dans une zone de concentrations beaucoup plus étroite (200 à 500 p.p.m.) que dans le cas des graines

TABLEAU 13

Comparaison des toxicités de l'acide vanillique et de l'acide para-coumarique au moyen de deux techniques différentes

Stade végétatif observé	Vanillique	*p*-coumarique	Technique employée
Germination	900	510	solution aqueuse gélosée *
Plantule	300	240	
Germination	1 000	720	milieu liquide ** HATSUDA et coll. (1965)
Plantule	660	290	

Les valeurs indiquées représentent la dose en p.p.m. dans le milieu de germination provoquant une toxicité de 50 p. 100 par rapport aux témoins sans acide phénol.

Indices établis d'après les résultats sur 8 espèces * ou 14 espèces végétales **.

(300 à plus de 1 000 p.p.m.). Enfin l'acide para-coumarique apparaît dans tous les cas comme le plus toxique de ces cinq composés.

Les résultats obtenus par deux techniques très différentes ont pu être comparés. En effet HATSUDA et coll. (1965) ont étudié la toxicité des acides para-coumarique et vanillique, vis-à-vis de 14 espèces, en réalisant la germination sur milieu liquide. Le tableau 13 montre une bonne correspondance entre leurs résultats et ceux que nous avons obtenus sur eau gélosée.

Les acides phénols apparaissent comme beaucoup moins toxiques que la coumarine étudiée dans les mêmes conditions expérimentales (tabl. 14).

TABLEAU 14

Toxicité de la coumarine

	Inhibition de la germination en p. 100 par rapport aux témoins, aux concentrations					(1)
	1 p.p.m.	10	100	200	500	
Ray-grass	3	33	100			5
Luzerne	13	30	51	100		10
Colza	18	31	54	100		100
Tomate		1	17	100		100
Blé	5	6	15	91	100	10
Trèfle			9	79	93	100
Cresson			9	15	85	100
Maïs					0	100

(1) Doses en p.p.m. du seuil 50 p. 100 d'inhibition du développement des plantules.

Ceci généralise les résultats que MAYER et EVENARI (1953) avaient établis pour la laitue.

L'activité des acides phénols aux très faibles concentrations a été recherchée (10^{-5} à 100 p.p.m.). Dans les deux cas étudiés (Ray-grass et Blé), aucune différence significative n'a pu être établie par rapport aux témoins. Un éventuel effet stimulant de ces composés est beaucoup plus difficile à mettre en évidence que leur effet inhibiteur.

Enfin, nous n'avons pas distingué en général dans nos mesures les racines des parties aériennes. L'observation semble cependant indiquer que les racines sont plus sensibles. Ceci a été précisé dans le cas du blé (tabl. 15). Ces résultats sont à rapprocher de ceux de NIELSON, CUDDY et WOODS (1960) qui ont montré que les extraits aqueux de certains végétaux inhibent plus les racines que les parties aériennes des plantules de blé.

En résumé, les acides phénols étudiés sont essentiellement inhibiteurs de la germination et du développement des jeunes plantules. L'acide para-coumarique est le plus actif d'entre eux.

TABLEAU 15

Inhibition d'allongement en p. 100 par rapport au témoin (Blé-Aronde) (1)

	*p*C	F	C	*p*OHb
Coléoptile	— 44	— 37	— 21	— 14
Racines	— 59	— 42	— 28	— 24

(1) Solutions d'acides phénols (cf. tabl. 9) à 200 p.p.m.

3. *Influence de l'acide para-coumarique sur la croissance du maïs*

Le but de cet essai est de rechercher l'influence de l'acide para-coumarique à différentes concentrations sur le maïs cultivé en solution nutritive, jusqu'à un stade avancé de sa croissance (épi pâteux).

Technique et culture.

Les graines de maïs (*I.N.R.A.* 260) sont mises à germer sur vermiculite humide, en serre, jusqu'au stade 2 feuilles. Les plantules sont alors sélectionnées pour l'uniformité et disposées sur des cuvettes en polyéthylène (contenance 5 litres) où elles effectueront leur croissance selon le dispositif utilisé par COÏC et coll. (1965).

La solution nutritive est aérée durant toute la culture. Sa composition est la suivante :

KNO_3	202 mg
$Ca(NO_3)_2$	492 mg
$MgSO_4$, $7H_2O$	185 mg
NaCl	29 mg
KH_2PO_4	136 mg

Oligo-éléments (Mo, B, Mn, Zn, Cu).
Fer complexé par EDTA : 25 mg de $FeSO_4$, $7H_2O$
Eau permutée q.s.p. 1 litre.

En outre, les concentrations suivantes en acide para-coumarique sont réalisées à partir de la solution minérale :

P. p. m	Molarité
0 = Témoin	0
10^{-3}	$6{,}1 \cdot 10^{-9}$ M
10^{-2}	$6{,}1 \cdot 10^{-8}$ M
10^{-1}	$6{,}1 \cdot 10^{-7}$ M
1	$6{,}1 \cdot 10^{-6}$ M
10	$6{,}1 \cdot 10^{-5}$ M
50	$3{,}05 \cdot 10^{-4}$ M

L'essai a été conduit en serre du 5-7-66 au 27-7-66, puis sous abri couvert jusqu'au 20-9-66. Chaque traitement porte sur 10 pieds de maïs répartis en deux cuvettes.

Renouvellement de la solution nutritive.

Dans une expérience préliminaire, la recherche de l'acide para-coumarique a été effectuée 24, 48 et 72 heures après le renouvellement complet de la solution nutritive.

Après 24 heures, il reste moins de 10 p. 100 de la quantité de produit initialement introduite.

En conséquence, la solution nutritive enrichie en acide para-coumarique a été renouvelée tous les deux jours pendant toute la durée de l'essai.

Résultats.

1° *Observations.*

Dès la fin du premier mois, on observe une inhibition du développement racinaire dans les cuvettes contenant 50 p.p.m. d'acide para-coumarique. La croissance des parties aériennes est également retardée par rapport aux autres traitements.

2° *Récolte.*

Les parties aériennes ont été pesées en vert, puis après séchage à 80°, jusqu'à poids constant.

Les résultats des pesées sont indiqués dans le tableau 16.

TABLEAU 16

Rendement du maïs à maturité, après culture sur des solutions nutritives contenant de l'acide para-coumarique

Traitement p.p.m	Poids moyen par pied					
	Poids frais			Poids sec		
	g	P. 100 par rapport au T	(1)	g	P. 100 par rapport au T	(1)
T	427	—	—	63,5	—	—
10^{-3}	486	+ 14	NS	69,6	+ 9,5	NS
10^{-2}	468	+ 10	NS	70,2	+ 10,5	NS
10^{-1}	362	— 15	NS	49,4	— 22	NS
1	383	— 10	NS	55,5	— 12,5	NS
10	318	— 25	NS	37,0	— 41,5	S
50	236	— 45	S	31,0	— 51	S

(1) Différence observée par rapport au témoin
NS : Non significative au seuil 0,05.
S : Significative au seuil 0,01.

Les résultats obtenus dans le cas des concentrations faibles (1 à 10^{-3} p.p.m.) ne sont pas significativement différents du témoin. En revanche, l'effet toxique se manifeste très nettement (significatif au seuil de $P = 0{,}01$) pour les doses de 10 et 50 p.p.m. particulièrement sur le poids sec.

Les tendances observées à 10^{-2} et 10^{-3} p.p.m. (activation de croissance) ainsi que la différence entre les effets sur poids frais et poids sec observés à la dose 10 p.p.m., sont difficilement interprétables en l'absence d'essais complémentaires.

Il est intéressant de rapprocher les seuils d'inhibition de 50 p. 100 cités précédemment et les résultats de cet essai (tabl. 17).

On peut en conclure, en tout cas pour le couple maïs/acide para-coumarique, que la plante exposée durant toute sa croissance à l'agent inhibiteur réagit à des doses beaucoup plus faibles que la graine ou la jeune plantule.

TABLEAU 17

Effet de l'acide para-coumarique sur le maïs

Phénomène observé	Dose en p.p.m. provoquant une inhibition de 50 % par rapport au témoin
Germination	> 1 000
Plantule de 3-4 jours	250
Plante au stade de fin de croissance	10-50

Dans ces conditions, les tests basés sur l'inhibition de la germination ou de la plantule peuvent se justifier à la rigueur pour des déterminations qualitatives permettant de classer sommairement les inhibiteurs et les plantes, mais ils risquent de faire sous-estimer l'importance de ces inhibiteurs au cours des phases ultérieures de la croissance.

Par exemple, GUENZI et MCCALLA (1966 *b*) dans un test « plantule de blé », sont amenés à étudier l'effet de concentrations en acides phénols comprises entre 600 et 5 000 p.p.m. : il y a de fortes chances pour que la croissance de cette plante considérée dans toute sa durée, soit affectée par des doses plus faibles.

4. *Influence de l'acide para-coumarique sur la croissance du Ray-grass cultivé en pots*

Dispositif expérimental.

La technique utilisée est celle décrite par CHAMINADE (1960, 1964) : dans le cas présent, les pots contiennent 1 kg de sous-sol de limon, et la variété de ray-grass est *Io* (I.N.R.A.). Chronologie de l'essai : semis 28-7-66, coupes les 29-8, 19-9, 17-10. La récolte provenant de chaque coupe est séchée à 80° jusqu'à poids constant, et pesée.

L'essai a porté sur 4 traitements (4 répétitions par traitement).

1. Témoin sans acide para-coumarique.
2. 10 mg d'acide para-coumarique au semis.
3. Trois apports de 10 mg chacun d'acide para-coumarique les 28-7, 29-8, 19-9.
4. 7 apports de 10 mg chacun d'acide para-coumarique les 28-7, 16-8, 29-8, 12-9, 19-9, 26-9, 3-10.

L'acide para-coumarique est apporté en solution au cours des arrosages.

Les quantités totales d'acide para-coumarique apportées dans les différents traitements sont donc respectivement : 0, 10, 30, 70 mg pour 1 kg de sol (poids sec).

Résultats.

Le tableau 18 donne les moyennes des poids secs obtenus pour les différentes coupes des quatre traitements.

Après la deuxième coupe, un effet de nécrose du collet est apparu dans les quatre répétitions du quatrième traitement. Corrélativement ce traitement est le seul pour lequel un effet dépressif sur le rendement soit significatif et ceci n'apparaît que sur les résultats de la troisième coupe (— 18 p. 100 par rapport au témoin).

TABLEAU 18

Rendement du Ray-grass cultivé en pots, en présence de différentes doses d'acide para-coumarique

Traitement : poids total en mg d'acide *p*-coumarique par pot	Poids sec en g par pot		
	1re coupe	2e coupe	3e coupe
0	9,48	5,76	5,45
10	9,87	5,77	5,65
30	9,91	6,12	5,50
70	10,19	6,36	4,46*

* Résultat significativement différent du témoin correspondant (au seuil de P : 0,05).

Analyse des acides phénols du sol à la suite des différents traitements.

Immédiatement après la troisième coupe, des échantillons de sol provenant des 4 traitements ont été séchés à 50° puis préparés et analysés selon la méthode décrite précédemment. Des échantillons du sol initial, non cultivé, ont été également analysés.

Les résultats de ces analyses, présentés au tableau 19, permettent deux remarques :

TABLEAU 19

Acides phénols analysés dans le sol avant et après culture de Ray-grass

Traitement	Acides phénols (en p.p.m. du sol sec)			
	p-coumarique	*p*-OH benzoïque	Férulique	Vanillique
Sol non cultivé	T	T	T	T
Culture de Ray-grass sans apport d'acide *p*C	0,4	1,3	1	0,5
Culture de Ray-grass avec 30 mg ac. *p*C	1,1	2,5	2,5	0,5
Culture de Ray-grass avec 70 mg ac. *p*C	0,8	1,9	1,1	0,5

T : Traces inférieures à 0,1 p.p.m.

1° après la culture de ray-grass, et quel que soit le traitement en acide para-coumarique, on retrouve des quantités notables d'acides phénols, au moins de 10 à 20 fois supérieures aux traces existant dans le sol non cultivé.

Ces acides proviennent vraisemblablement de la décomposition des débris de racines accumulés au cours de la culture.

2° les quantités d'acide para-coumarique trouvées dans les sols correspondant aux différents traitements ne sont pas significativement différentes (compte tenu de la précision médiocre du dosage effectué).

Mais de toutes façons, leur niveau reste très faible en regard des apports effectués (traitements 3 et 4).

Dans ces conditions, il est difficile d'interpréter les résultats observés. On ne peut qu'avancer quelques hypothèses explicatives :

— dégradation rapide par la microflore de l'acide para-coumarique apporté ;

— inactivation de ce composé par des phénomènes physico-chimiques au contact de la fraction minérale du sol ;

— accumulation provisoire du composé en surface, particulièrement sensible en fin de culture à cause du ralentissement du rythme d'arrosage à cette époque (octobre).

Cette dernière hypothèse expliquerait la localisation au collet de l'effet de nécrose.

CONCLUSION

La présence d'acides phénols libres dans les sols, déjà signalée par quelques auteurs, est confirmée pour des sols appartenant à des unités pédologiques très différentes.

Le choix de la technique d'extraction utilisée dans cette étude peut paraître arbitraire : il convient de préciser qu'il ne s'agit que d'un test destiné à comparer entre eux différents sols, ou différentes pratiques culturales appliquées à un même sol (par exemple, enfouissement d'amendements organiques divers).

Il est d'autre part vraisemblable qu'une partie importante des acides phénols extraits en milieu alcalin a pour origine les débris végétaux en cours de décomposition. Pour préciser ce point, une méthode de séparation densimétrique de ces débris pourrait être envisagée avant toute extraction ; mais la technique actuellement disponible (Monnier et coll., 1962) utilise un mélange bromoforme-alcool capable de solubiliser partiellement les acides phénols et ne peut donc pas être appliquée directement.

Les essais relatifs à l'activité des acides phénols vis-à-vis des végétaux confirment leur rôle d'inhibiteurs de la germination et montrent que les plantes en cours de développement sont beaucoup plus sensibles que les graines à ces agents. Dans des conditions normales de croissance (alimentation minérale, aération, etc.) aucun effet d'activation n'a été observé ; ceci est en accord avec les travaux de Flaig (1965) montrant que c'est en conditions suboptimales que l'on observe ces effets.

Les résultats obtenus permettent de préciser que les quantités d'acides phénols « libres » ne sont pas nécessairement en relation directe avec le taux de carbone total du sol, et que l'enrichissement systématique de ce dernier par certains amendements organiques peut conduire à l'augmentation du taux d'un acide phénol déterminé.

C'est le cas de l'acide para-coumarique dont la concentration dans le sol est particulièrement augmentée par l'enfouissement de tiges de Maïs.

Cette observation, jointe aux résultats concernant le caractère particulièrement phytotoxique de cet acide permet d'émettre une hypothèse relative à la fatigue de certains sols du Sud-Ouest atlantique soumis durant plusieurs années à la monoculture du Maïs : l'accumulation d'acide para-coumarique provenant de la décomposition des tiges de Maïs qui sont régulièrement enfouies, pourrait peut-être expliquer les irrégularités de croissance et les baisses de rendement qui caractérisent cette fatigue.

Mais les déterminations quantitatives effectuées ne permettent pas de définir d'une façon générale les seuils à partir desquels on puisse escompter *in situ* un effet des acides phénols sur la croissance d'un végétal donné.

Pour parvenir à ce résultat, il semble que les recherches doivent être orientées dans les directions suivantes :

— étude de la nature des liaisons existant entre les acides phénols et les fractions organique et minérale du sol, liaisons qui sont rompues par l'action d'un réactif alcalin à froid ;

— étude du rythme d'évolution des acides phénols dans le sol sous l'action des processus biologiques de dégradation ;

— étude des modifications de l'activité et de la stabilité des acides phénols par fixation sur la fraction minérale du sol.

Reçu pour publication en avril 1967.

SUMMARY

PRESENCE OF FREE PHENOLIC ACIDS IN THE SOIL.
INVESTIGATION OF THEIR EFFECTS ON GERMINATION AND GROWTH OF PLANTS

The first part reviews the literature concerning the investigation of free phenolic acids in the soil and secondly, their activity in connection with the physiological processes of plants. The following experiments are described :

a) The investigation of phenolic acids in various types of soils reveales that the para-hydrobenzoic, vanillic and para-coumaric acids are quite commonly present in soils. The amount of the latter is closely linked with tilling conditions (soil amendment).

b) The para-hydrobenzoic, vanillic, para-coumaric, caffeic and ferulic acids are all phytotoxic towards germination, and this effect is even stronger on the growth of seedlings. The para-coumaric acid is the most active. Ten parts per million of the latter causes a 50 p. 100 drop in the dry-matter yield of Maize cultivated on a nutrient solution up to ripeness.

Lastly, the effects of these compounds under natural conditions are discussed.

ZUSAMMENFASSUNG

DAS VORHANDENSEIN FREIER PHENOLSÄUREN IM BODEN.
UNTERSUCHUNG ÜBER IHRE EINWIRKUNG AUF DIE KEIMUNG
UND DAS WACHSTUM DER PFLANZEN

In einem ersten Teil werden die verschiedenen Arbeiten über die freien Phenolsäuren des Bodens, ferner die Erforschung ihrer Wirkung gegenüber den physiologischen Vorgängen der Pflanzen, erörtert. Daraufhin werden Folgende Versuche beschrieben :

a) die Untersuchung der Phenolsäuren in verschiedenen Bodenarten gibyt Auskunft über das ziemlich konstante Vorhandensein der Parahydroxybenzoen-Vanillin- und Paracumarsäure. Der reichliche Gehalt an letzterer steht in direktem Zusammenhang mit den Bewirtschaftungsbedingungen des Bodens (Düngerzufuhr).

b) die Parahydroxybenzoen-Vanillin-Paracumar-Kaffee- und Ferulasäure haben einen phytotoxikologischen Charakter gegenüber der Keimung, der gegenüber der Entwicklung der Setzlinge noch ausgeprägter ist. Die Paracumarisäure ist die wirksamste. Letztere, bei einer Dosis von 10 ppm, verringert den Ertrag an Trockenmasse von bis zur Reife in Nährlösung erzeugtem Mais um 50 p. 100.

Die Wirkungsmöglichkeiten dieser Verbindungen unter natürlichen Bedingungen werden diskutiert.

РЕЗЮМЕ

Присутствие свободных фенольных кислот в почве. Изучение их влияния на прорастание и на рост растений.

Ж. Р. ХЕННЕКЭН. К. ЖЮСТ.

В первой части данного труда авторы разбирают разные работы относящиеся к изучению свободных фенольных кислот почвы и их активности в отношении физиологических процессов происходящих в растении. Затем следует описание проведенных опытов :

а. Изучение фенольных кислот присутствующих в различных типах почв позволило отметить почти постоянное присутствие пара-гидро-окси-бензойной, ванильной и пара-кумаровой кислот. Изобилие этой последней связано, кроме-того, с условиями использования почв (мелиорация).

б. Пара-гидро-окси-бензойная, ванильная, пара-кумаровая, кофейная и другие фенольные кислоты носят все, по отношению к прорастанию, фитотоксический характер, еще усиляющийся при развитии проростков. Самой активной из них является пара-кумаровая кислота, которая в дозе 10 ппм. уменьшает на 50 % урожай сухого вещества кукурузы, выращеной до полной спелости на питательной смеси.

Авторы рассматривают также возможные действия этих соединений в естественных условиях.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BORNER H., 1960. Liberation of organic substances from higher plants and their role in the soil sickness problem. *Bot. Rev.*, **26**, 393-424.

BRUCKERT S., 1966. Répartition des acides hydrosolubles dans quelques profils de sols forestiers. *C. R. Acad. Sci. série D*, **263**, 1572-1575.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation, types d'essais pour tester l'efficacité des engrais humiques. *Ann. agron.*, **11**, 121-133.

CHAMINADE R., 1964. Étude des carences minérales du sol par l'expérimentation en petits vases de végétation. *Sci. Sol* (Versailles), 157-168.

CHAMINADE R., 1966. L'effet physiologique des constituants de la matière organique des sols sur le métabolisme des plantes, la croissance et le rendement. *The use of isotopes in soil organic matter studies*, 35-47. Pergamon Press.

COIC Y., LESAINT Christiane, PIOLLAT Marie-Thérèse, 1965. L'absorption des polyphosphates par le maïs et la tomate. *Ann. Physiol. vég.*, **7**, 75-83.

EVENARI M., 1949. Germination inhibitors. *Bot. Rev.*, **15**, 153-194.

FLAIG W., 1965. Action des produits de dégradation de la lignine sur le métabolisme végétal ; mécanisme possible de cette action. *C. R. Acad. Agric.*, **51**, 1118-1138.

FLAIG W., 1966. The chemistry of humic substances. *The use of isotopes in the soil organic matter studies* 103-127. Pergamon Press.

FLOOD A. E., KIRKHAM D. S., 1960. The effect of some phenolic compounds on the growth and sporulation of two *Venturia* species. *Phenolics in plants in Health and Disease*, 81-85. Pergamon Press.

GORDON S. A., PALEG Leslie G., 1961. Formation of auxin from tryptophan through action of polyphenols. *Plant Physiol.*, **36**, 838-845.

GORTNER W. A., KENT Martha J., 1958. The coenzyme requirement and enzyme inhibitors of pineapple indoleacetic acid oxydase. *J. biol. Chem.*, **233**, 731-735.

GUENZI W. D., MCCALLA T. M., 1966 *a*. Phytotoxic substances extracted from soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 214-216.

GUENZI W. D., MCCALLA T. M., 1966 *b*. Phenolic acids in oats, wheat, sorghum and corn residues and their phytotoxicity. *Agron. J.*, **58**, 303-304.

HARBORNE J. B., 1964. *Biochemistry of phenolic compounds*, 616 p. Academic Press.

HATSUDA Y., NISHIMURA S., HAMASAKI T., RENBUTSU M., 1965. Inhibitory effects of some phytotoxic substances produced by plant roots upon the growth of higher plant seedlings and microorganisms. *J. Fac. Agric. Tottori Univ.*, **4**, 183-188.

IBRAHIM R. K., TOWERS G. H. N., 1960. The identification by paper chromatography of plant phenolic acids. *Arch. Biochem. Biophys.*, **87**, 125-128.

JACQUIN F., 1963. Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques. (Thèse). *Bull. Éc. nation. sup. agron. Nancy*, **5**, 3-156.

JACQUIN F., BRUCKERT S., 1965. Identification et évolution des acides hydrosolubles de deux litières forestières. *C. R. Acad. Sci., série D*, **260**, 4556-4559.

LEE T. T., SKOOG F., 1965. Effects of substituted phenols on bud formation and growth of Tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant.*, **18**, 386-402.

MCCALLA T. M., HASKINS F. A., 1964. Phytotoxic substances from soil microorganisms and crop residues. *Bacteriol. Rev.*, **28**, 181-207.

MARTINEZ F. M., DEPETRE A. A., 1965. Presencia de compuestos fenolicos libres en tipos de suelos distintos. *An. Edafol. Agrobiol.*, **24**, 633-642.

MASSART L., 1957. Inhibiteurs de la germination dans les glomérules de la betterave à sucre et dans d'autres fruits secs et graines. *Biokhimija*, **22**, 417-420.

MAYER A. M., 1963. A possible role of phenols in the oxidative process of lettuce mitochondria. *Israel J. Bot.*, **12**, 55-63.

MAYER A. M., EVENARI M., 1963. The activity of organic acids as germination inhibitors and its relation to pH. *J. exper. Bot.*, **4**, 257-263.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG Colette, 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13**, 55-63.

NAGUIB M. I., 1962. Effect of benzoïc acid and its derivatives on plant metabolism. *Bull. Fac. Sci. Cairo Univ.*, **38**, 61-86.

NIELSEN K. F., CUDDY T. F., WOODS W. B., 1960. The influence of the extract of some crops and soil residues on germination and growth. *Canad. J. Plant Sci.*, **40**, 188-197.

NITSCH J. P., NITSCH Colette, 1961. Synergistes naturels des auxines et des gibbérellines. *Bull. Soc. bot. Fr.*, **108**, 349-362.

NITSCH J. P., NITSCH Colette, 1962. Composés phénoliques et croissance végétale. *Ann. Physiol. vég.*, **4**, 211-225.

PATRICK Z. A., TOUSSOUN T. A., KOCH L. W., 1954. Effect of crop residue decomposition products on plant roots. *Annu. Rev. Phytopath.*, **2**, 267-292.

PAULI F. W., 1961. Humus and plant. *Sci. Progr.*, **49**, 427-439.

PILET P. E., 1964. Effect of chlorogenic acid on the auxin catabolism and the auxin content of root tissues. *Phytochemistry*, **3**, 617-621.

PILET P. E., 1966. Effect of parahydroxybenzoïc acid on growth, auxin content, and auxin catabolism. *Phytochemistry*, **5**, 77-82.

PILET P. E., GASPAR Th., 1965. Action des acides *o*-, *m*- et *p*-hydroxybenzoïques sur le catabolisme auxinique et la croissance. *Ann. Physiol. vég.*, **7**, 147-155.

RIBÉREAU-GAYON P., 1964. *Les composés phénoliques du raisin et du vin*. I.N.R.A. éd.

DE ROUBAIX J., LAZAR O., 1960. The inhibitory substances contained in sugar beet glomerules. *Phenolics in plants in Health and Disease*, 35-42. Pergamon Press.

SCHUBERT W. J., 1965. *Lignin Biochemistry*, 131 p. Academic Press.

STOTZKY G., CULBRETH W., MISH L. B., 1962. Apparatus for growing plants with aseptic roots for collection of root exudates and CO^2. *Plant Physiol.*, **37**, 332-341.

THIMANN K. V., TOMASZEVSKI M., PORTER W. L., 1962. Growth promoting activity of Caffeic acid. *Nature*, **193**, 1203.

TOMASZEWSKI M., 1964. The mechanism of synergistic effects between auxin and some natural phenolic substances. *Regulateurs naturels de la croissance végétale,* 335-351. C.N.R.S.

VAN SUMERE C. F., 1960. Germination inhibitors in plant material. *Phenolics in Plants in Health and Disease,* 25-34 p. Pergamon Press.

VAN SUMERE C. F., VAN SUMERE-DEPRETER C., VINING L. C., LEDINGHAM G. A., 1957. Coumarins and phenolic acids in the uredospores of wheat stem rust. *Canad. J. Microbiol.*, **3**, 847-862.

VERBEEK Rita, DUMITRU I. F., 1964. Effet de l'acide férulique sur la formation de l'α-amylase et la germination de l'orge. *Arch. internation. Physiol. Bioch.* (Liège), **72**, 819-824.

WHITEHEAD D. C., 1963. Some aspects of the influence of organic matter on soil fertility. *Soils Fertil.*, **26**, 217-223.

WHITEHEAD D. C., 1964. Identification of *p*-hydroxybenzoïc, vanillic, *p*-coumaric and ferulic acids in soils. *Nature,* **202**, 417-418.

WILLIAMS A. H., 1963. Enzyme inhibition by phenolic compounds. *Enzyme chemistry of phenolic compounds,* 87-95. Pergamon Press.

WOODS F. W., 1960. Biological antagonisms due to phytotoxic root exudates. *Bot. Rev.*, **26**, 546-569.

ZENK M. H., MULLER G., 1963. *In vivo* destruction of exogenously applied IAA as influenced by naturally occuring phenolic acids. *Nature,* **200**, 761-763.

Ann. agron., 1967, **18** (5), 571-572.

CHRONIQUE DES LIVRES

SIRONVAL C. — LE CHLOROPLASTE. CROISSANCE ET VIEILLISSEMENT. Paris, Masson, 1967, 366 p.

Cet ouvrage collectif présente 31 articles de spécialistes groupés en 6 chapitres : ontogénie du chloroplaste, structure, formation et contenu des lamelles plastidiales, mécanisme des synthèses protéiques au sein des plastes, évolution de l'activité photosynthétique, action des facteurs de l'environnement sur la croissance plastidiale.

Chaque chapitre est introduit par un commentaire qui en fait la synthèse, souligne les problèmes posés et met en évidence les points acquis.

Le commentaire des divers chapitres forme un tout et peut se lire à part. Il rend l'ouvrage accessible aux non-spécialistes, en particulier aux étudiants. Ces derniers y trouveront l'occasion de se familiariser avec la genèse des questions que pose actuellement l'étude du chloroplaste, envisagé non seulement du point de vue de son rôle dans la photosynthèse, mais encore dans ses rapports avec le reste de la cellule et avec le végétal tout entier. Partant du commentaire, le non-spécialiste est mis en mesure d'aborder, dans le volume lui-même, l'examen de telle ou telle question particulière, et d'entreprendre la lecture de l'article que lui consacre tel ou tel spécialiste.

Les spécialistes eux-mêmes trouveront certainement matière à réflexion dans la manière dont les données expérimentales sont présentées.

Les collaborateurs de l'ouvrage sont tous des scientifiques de qualité, bien connus par leurs travaux. Ils ont eu l'occasion d'échanger leurs vues au cours d'un colloque qui les a réunis.

L'illustration est abondante (105 figures et 32 planches). Beaucoup de données sont présentées en français pour la première fois. Les références sont nombreuses et constituent une base de départ raisonnable pour l'étude approfondie de quelques questions.

HOMES M. V. L., VAN SCHOOR G. — L'ALIMENTATION MINÉRALE ÉQUILIBRÉE DES VÉGÉTAUX. THÉORIE. MÉTHODOLOGIE. APPLICATIONS.

Vol. I — L'alimentation sur milieux dépourvus de fertilité naturelle, 298 p., 1961.

Vol. II — Extension aux sols réels et à la fumure, généralisation, 424 p., 1966.

Wetteren (Belgique), Universa.

Les travaux des Professeurs HOMES M. V. et VAN SCHOOR G. H. ont fait connaître depuis plusieurs années certaines de leurs conceptions en matière d'alimentation minérale. Il en résulte quelques orientations : les relations quantitatives entre la croissance de la plante et la composition complète du milieu dont elle se nourrit, les relations entre la composition minérale de la plante et celle du milieu nutritif.

Cette dernière orientation débouche, dans le domaine pratique, sur les principes du diagnostic foliaire ou, plus généralement, sur le phytodiagnostic des carences alimentaires. La première a conduit, dans ce domaine, à la formation et à la mise au point d'une méthode expérimentale rationnelle de la détermination des besoins alimentaires, la méthode dite des Variantes Systématiques. Celle-ci, tout d'abord développée à propos de la culture en milieux artificiels entièrement contrôlés (vol. I) est actuellement étendue à l'expérimentation en champ (vol. II).

Ce second volume, en outre, synthétise l'ensemble des conceptions théoriques et de leurs applications pratiques. Il illustre celles-ci par des exemples et établit des conséquences méthodologiques.

BLACK C. A. et Co., éd. — METHODS OF SOIL ANALYSIS.

Part 1. — Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. 770 p.

Part 2. — Chemical and microbiological properties, 802 p.

Madison, American Society of Agronomy, Coll. " Agronomy " n° 9, 1965.

Le présent ouvrage présente en 113 chapitres, auxquels ont contribué une centaine d'auteurs, les méthodes utilisées pour l'étude des propriétés physiques, chimiques et microbiologiques des sols. Les premiers chapitres sont consacrés aux méthodes de mesure et d'échantillonnage et à l'estimation mathématique des erreurs ; 15 chapitres traitent d'hydrologie : humidité, succion, capacité de rétention pour l'eau, évapotranspiration... L'atmosphère du sol, les propriétés thermiques occupent les huit chapitres suivants. L'ouvrage traite ensuite des propriétés mécaniques des sols : densité, cohésion, compacité... Puis les problèmes de déterminations minéralogique et pétrographique sont abordés et les méthodes d'étude décrites.

La seconde partie de l'ouvrage est consacrée aux propriétés chimiques : analyse élémentaire, capacité d'échange de cations. Vingt-huit chapitres traitent des constituants inorganiques du sol et 6 chapitres de la chimie organique (matière organique, acides aminés, sucres). L'ouvrage s'achève par l'étude des microorganismes et de la microflore (bactéries, algues, champignons) et de la microfaune.

KUBIENA W. L. — DIE MICROMORPHOMETRISCHE BODENANALYSE. — Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag, 1967, 136 p.

De nos jours, la micromorphologie est une partie intégrante de la recherche pédologique ; non seulement elle a contribué à enrichir la pédologie mais elle a permis d'établir des liens avec les disciplines voisines. L'analyse structurale micromorphologique englobe toutes les méthodes qui servent à effectuer la détermination quantitative des caractères micromorphologiques dans la structure du sol : grandeur et forme des agrégats, méats, particules minérales, débris végétaux, etc... Dans les différents chapitres, on a particulièrement mis l'accent sur les applications pratiques de ces méthodes dans différentes conditions. On a en même temps exposé de façon détaillée les techniques les plus récentes de la préparation en série, à la machine, de coupe minces polies.

Les différents articles de cet ouvrage ont été fournis par des collaborateurs de l'auteur, à Hambourg et Reinbek et par plusieurs instituts espagnols. Ils traitent de problèmes agricoles et sylvicoles ainsi que des techniques culturales, des analyses de sites, de minéralogie pédologique et de sédimentologie.

CLERCK C. — THE ECONOMICS OF IRRIGATION. — Oxford, Pergamon Press, 1967, 116 p.

Cet ouvrage traite du problème des prix de revient de l'irrigation.

Après avoir donné quelques définitions, l'auteur consacre un chapitre aux besoins en eau des plantes et reprend les conclusions du Dr Penman (du Laboratoire de physique du sol de Rothamsted) selon lesquelles les besoins en eau des plantes cultivées sont à peu près les mêmes, si elles grandissent dans des sols identiques et sont soumises aux mêmes conditions climatiques. Ce chapitre est illustré de tableaux donnant les besoins en eau de différentes cultures dans divers pays.

L'auteur donne ensuite les prix de revient de l'irrigation dans de nombreux pays et pour différentes méthodes.

Enfin, un dernier chapitre est consacré à l'irrigation par désalinisation de l'eau de mer dont le coût est encore largement au-dessus de ce que souhaite payer n'importe quel agriculteur.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : DUPONT et DUVAL (1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatres langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la Publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 12-1967.

Dépôt légal : 4e trimestre 1967. N° d'impression : 1231.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 18 1967 NUMÉRO 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149 rue de Grenelle, PARIS-7e

Ann. agron., 1967, **18** (6), 579-599.

ACTION ET ARRIÈRE-ACTION DE LA SÉCHERESSE SUR LA CROISSANCE ET LA PRODUCTION DU TOURNESOL

M. ROBELIN

avec la collaboration technique de L. LEBLEVENNEC, P. ROUSSEAU, D. EZARD

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Massif central, 63 - Clermont-Ferrand
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Tout déficit d'alimentation hydrique intervenant entre la différenciation des organes floraux et la maturité diminue la production de grains du Tournesol ; la sensibilité est plus accusée au cours des 20 jours qui précèdent et des 20 jours qui suivent la floraison.

La sécheresse réduit la photosynthèse nette dans les mêmes proportions que la transpiration.

L'activité par unité de surface de feuille et la surface foliaire sont plus ou moins touchées selon la période d'incidence de la sécheresse.

INTRODUCTION

La dernière décennie a vu se développer un regain d'intérêt pour toutes les techniques permettant à l'agriculture de s'affranchir, dans la mesure du possible, des aléas climatiques ; cette préoccupation va de pair avec la recherche de l'intensification et de la régularisation de la production au sein d'une agriculture qui s'industrialise. La plus évidente et la plus importante de ces techniques est l'irrigation ; mais, bien qu'elle soit aussi ancienne que l'agriculture elle-même dans les régions sèches, on doit reconnaître que sa mise en œuvre demande, dans le contexte économique actuel, un certain nombre d'informations plus précises et personnalisées à chaque type de spéculation. En dehors des problèmes d'ordre pédologique les questions essentielles concernent :

1. la consommation d'eau de la culture selon la constitution du couvert et le climat (C. B. TANNER, 1960 ; M. ROBELIN, 1962 ; K. E. CACKETT, 1964).

2. le comportement de la plante en condition sèche, en particulier l'évolution de la production commercialisable selon la localisation de ces conditions dans la période de végétation (P. J. SALTER, 1963; B. R. de LIS et *al.*, 1964; RAMADHAR SINGH, 1966).

Il s'agit en somme de définir les conditions de rentabilisation maximale des apports d'eau par leur modulation dans le temps selon la consommation et la sensibilité de la plante.

Ces mêmes informations permettent d'autre part d'apprécier le degré d'adaptation d'une spéculation à un climat.

Quel que soit cependant l'intérêt de telles études, il est évident qu'à longue échéance seule la connaissance des mécanismes reliant l'état et la consommation hydriques des végétaux à leur activité de croissance (DE PARCEVAUX, 1963; S. MÉRIAUX, 1963; R. J. BOUCHET, 1963) permettra de poser et résoudre logiquement tout problème particulier et de promouvoir de nouvelles techniques.

Les théories momentanément avancées s'appuient sur l'analyse des phénomènes régissant les échanges de la feuille ou du couvert pour édifier une synthèse au niveau des corrélations entre échanges (transpiratoire et photosynthétique) (CHARTIER, 1967). Ces méthodes inductives, très fécondes, demandent le cautionnement des faits expérimentaux aussi bien pour leurs bases que pour leurs conclusions.

C'est pourquoi, l'étude sur le comportement du tournesol à la sécheresse, présentée ici, participe de ces deux préoccupations essentielles :

1. donner une réponse concrète à un problème pratique ; ce sera dans le paragraphe des « Résultats », la notation de l'influence de la période de sécheresse sur la production de grains ;

2. confronter les résultats expérimentaux avec les concepts et mettre en évidence tout phénomène d'apparence généralisable dans les limites fixées par notre technique et les conditions de l'expérience ; ainsi apparaîtront dans la « Discussion » l'étude comparée de la transpiration et de la croissance et un certain nombre d'observations sur les modalités d'action de la sécheresse.

I. — MÉTHODE ET TECHNIQUES

1. *Conditions de culture*

L'essai est conduit en pots sous abri bien ventilé ; les conditions climatiques intérieures sont très voisines des conditions de plein air sauf en ce qui concerne l'éclairement, diminué en moyenne de 15 à 20 p. 100.

Chaque pot contient, en poids sec, 9,900 kg de terre argilo-calcaire de très forte stabilité structurale, la densité apparente réalisée est voisine de 1,0 ; le volant d'eau utilisable (entre pF 1,5 et pF 4,2) par pot est voisin de 1 850 cm^3. La fertilisation apportée assure une alimentation minérale non limitante.

L'approvisionnement en eau, sous tension de 30 cm environ, s'effectue de façon continue à partir d'une bougie poreuse (fig. 1) ; il s'agit de la transposition d'une méthode préconisée par D. W. L. READ. Une technique analogue a été mise au point au Laboratoire des Sols de Versailles (A. FEODOROFF).

2. *Matériel végétal*

Nous n'avons pas retenu les « variétés » de tournesol actuellement cultivées ; elles sont trop hétérogènes pour permettre une analyse quelconque sur un échantillonnage forcément restreint. Le tournesol utilisé est un hybride simple obtenu à partir du croisement d'une lignée de *Vniimk 6540*

(2 générations en autofécondation), parent femelle d'une part, et d'une lignée de *Nain Noir* (3 générations en autofécondation) parent mâle d'autre part. Toutes les plantes ne présentant pas le caractère hybride *Nain Noir* reconnaissable à la couleur violacée de l'axe hypocotylé, sont éliminées à la germination. A l'intérieur de cet échantillonnage l'hétérogénéité est moins forte que dans chacune des populations parentales. Elle est encore diminuée par des tris ultérieurs portant sur la disposition des feuilles et la taille des jeunes plantes. Partis de 5 plantes par pot nous en conservons 1 au départ de l'essai.

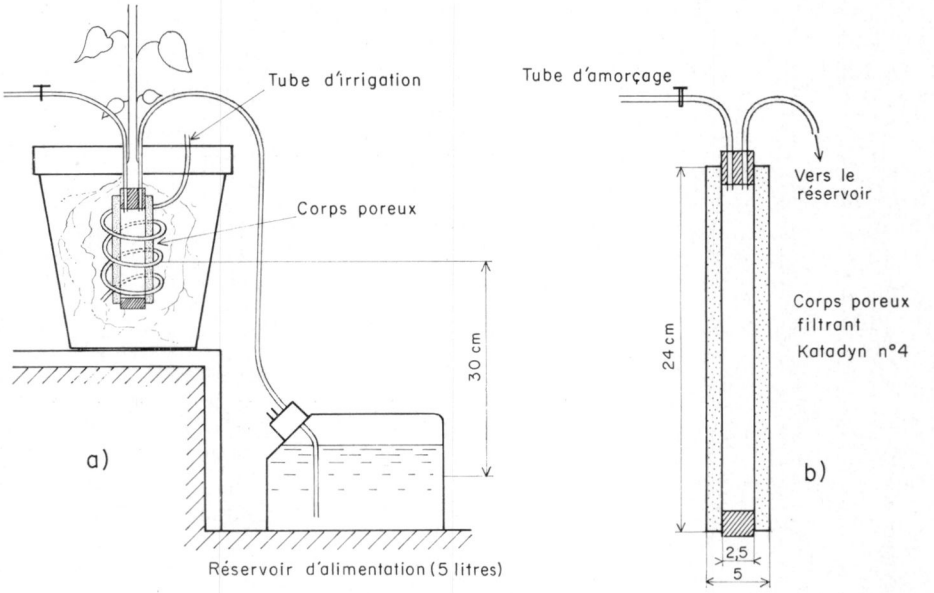


FIG. 1. — *Systèmes d'irrigation*
a) montage de l'ensemble du dispositif
b) détail du corps poreux

Enfin, un indice de vigueur est attribué à chaque plante d'après sa transpiration contrôlée pendant les 15 jours précédant le premier traitement. Les plantes sont alors groupées en cinq lots aussi homogènes que possible quant à cet indice.

La consommation d'eau est contrôlée chaque jour par pesée du réservoir d'alimentation (1).

3. *Conduite de l'essai*

Traitements.

A l'intérieur de chaque lot de 10 plantes, nous avons distribué les 10 traitements présentés dans le tableau 1.

Le traitement 1 correspond au témoin bien alimenté en eau durant toute la période de végétation ; du n° 2 au n° 9 nous trouvons les différents traitements de sécheresse appliqués dans les phases successives du développement ; les durées en sont de 10 ou 11 jours (un peu plus longues pour le traitement avant récolte). Le chiffre « intensité » de sécheresse représente, en pourcentage, le déficit de transpiration du traité (T_n) par rapport au témoin (T_1) dans la période considérée (n).

$$\text{Intensité de la sécheresse} = \frac{T_1 - T_n}{T_1} \times 100.$$

Le n° 10 doit permettre de tester le cumul de deux traitements consécutifs.

Réalisation des traitements.

Durant la période d'application de la sécheresse, le système d'alimentation continu est débranché et la transpiration contrôlée par pesée du pot ; les irrigations effectuées par le serpentin, sont con-

(1) Pendant les journées les plus chaudes l'absorption a parfois dépassé les possibilités de débit du corps poreux ; un apport complémentaire d'eau est alors effectué dans la masse par un serpentin (fig. 1) ; l'excès d'eau est évacué par la bougie. Le bilan de consommation tient compte de cet apport.

TABLEAU I

Traitements N°	Nature du traitement					
	Intensité de sécheresse	Durée en jours	Date d'application (1965)	Age de la plante	Phase de développement du témoin	
					Tige (cm)	Inflorescence
1	0	0				
2	62	10	12 au 21-6	38e au 42e jour	44 à 81	Le 12-6 gonflement de l'apex, plateau lisse, ⌀ 2 mm. Le 21-6 ébauches florales visibles, plateau ⌀ 13 mm.
3	48	10	22-6 au 1-7	43e au 52e jour	81 à 119	Le 1-7 anthères et ovaires différenciés, plateau ⌀ 29 mm.
4	60	10	2-7 au 11-7	58e au 62e jour	119 à 145	Le 11-7 bractées du capitule refermées, mais pétales bien formés, plateau ⌀ 55 mm.
5	71	11	12-7 au 22-7	68e au 73e jour	145 à 170	Floraison du 17 au 22-7 ; le 22-7 fécondation du 1/3 moyen du capitule, plateau ⌀ 10 cm.
6	69	11	23-7 au 2-8	74e au 84e jour	—	Le 2-8 fécondation totale ; pétales fanés ; plateau ⌀ 18 cm.
7	69	10	3-8 au 12-8	85e au 94e jour	—	Le 12-8 teneur en huile 14,6 p. 100 de M. F. des grains.
8	47	10	13-8 au 22-8	95e au 104e jour	—	Le 22-8 teneur en huile 25,2 p. 100 de M. F. des grains.
9	46	16	23-8 au 7-9	105e au 120e jour	—	Le 8/9 récolte.
10	60	20	22-6 au 11-7	48e au 62e jour	Voir les caractéristiques des traitements 3 et 4.	

duites de telle sorte que la transpiration du traité soit, sur l'ensemble de la période considérée, une fraction déterminée de celle du témoin ; dans le cas présent nous nous étions proposé de réaliser une intensité de sécheresse de 50 p. 100 ; mais il n'a pas été possible d'éviter une assez forte variation de cet indice entre traitements par suite des irrégularités du pouvoir évaporant, en particulier des brutales accélérations de la transpiration ; l'intensité moyenne se situe à 59 p. 100 avec une marge de variation de ± 12 p. 100.

L'ensemble constitue un dispositif en blocs de Fischer comprenant 10 traitements et 5 répétitions.

4. *Étude du développement*

Au début de chaque période de sécheresse nous contrôlons le stade de développement atteint par deux plantes prélevées dans un lot témoin supplémentaire. La croissance de chaque organe est également suivie par la morphologie et le poids de matière sèche ; les surfaces foliaires contrôlées par pesées du calque des feuilles sur papier calibré ont permis d'établir une corrélation entre surface et dimension des feuilles (surface = 0,74 longueur × largeur). Cette relation est utilisée pour l'évaluation des surfaces des plants traités en cours d'essai. Une telle estimation conduit à une erreur inférieure à 100 cm² par plante.

II. — RÉSULTATS

Nous examinerons tout d'abord les données recueillies en cours d'expérience ; sur elles s'appuiera l'essentiel de notre discussion (chap. III) ; puis nous présenterons l'ensemble des résultats à la récolte, fournissant en eux-mêmes les conclusions pratiques de cet essai.

1. *Contrôle en cours de végétation*

1. 1. *Croissance normale.*

Les différentes étapes du développement sont notées dans le tableau 1. Nous avons schématisé par ailleurs (fig. 2) la croissance de chaque organe et l'évolution de la matière sèche totale ou photosynthèse nette.

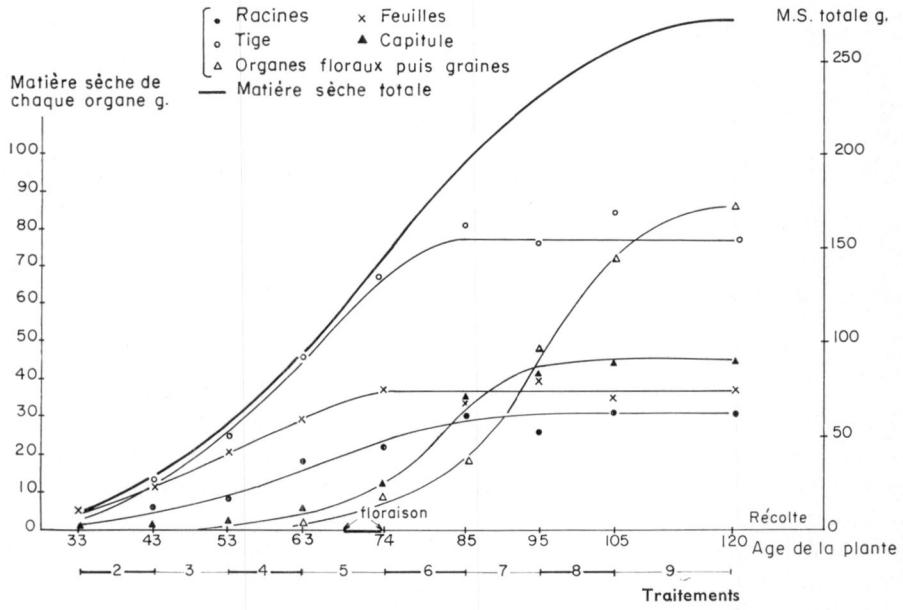


FIG. 2. — *Croissance des différents organes et évolution de la matière sèche totale du témoin*

Les poids de racine, tige, feuille atteignent leur plafond presque simultanément peu après la floraison. Cette période correspond à la vitesse maximale de croissance du capitule (grains exclus) dont le développement s'arrête 1 mois après floraison.

La matière sèche des graines s'accroît très rapidement à partir du 85e jour de végétation (10 jours après floraison).

Le lecteur pourra situer, sur ce graphique, la position de chaque traitement en regard des vitesses de croissance globale et de chaque organe.

1. 2. *Surface foliaire.*

Nous avons éliminé du contrôle les feuilles nécrosées ou simplement jaunissantes. Les chiffres portés dans le tableau 2 correspondent aux surfaces apparemment actives.

Sur les plantes bien alimentées en eau la surface « fonctionnelle » s'accroît assez régulièrement à la vitesse approximative de deux dm^2 par jour au cours du deuxième mois de végétation ; elle passe par un maximum à la floraison ; à partir de cette période les feuilles premières formées jaunissent et se nécrosent, la surface totale diminue.

Les déterminations effectuées sur tournesols traités dans la phase de croissance accélérée montrent que, durant la période d'application de la sécheresse, le bilan — croissance moins nécrose — est positif pour les deux traitements situés avant le 53e jour d'âge, la croissance foliaire est fortement ralentie mais non stoppée ; plus tard les nécroses égalent puis dépassent une augmentation éventuelle de surface des jeunes feuilles. Après traitement, et dans les deux cas analysés (2 et 4) la croissance foliaire reprend avec une vigueur supérieure à celle du témoin ; tout se passe à cet égard comme si la plante avait pris du retard et se trouvait à un stade plus jeune. Ceci n'est pas exact pour tous les organes ; nous n'avons pas noté, par exemple, de décalage de floraison interprêtable à partir des mêmes traitements.

1. 3. *Transpiration.*

La transpiration en cours de traitement constitue la variable imposée permettant d'évaluer le niveau de la sécheresse ; il ne s'agit donc pas à proprement parler d'un résultat.

Par contre la transpiration ultérieure est influencée par le traitement et de façon variable en intensité et durée selon la période d'incidence de la sécheresse. Cette valeur étant par ailleurs fonction du pouvoir évaporant nous l'exprimons en indice par rapport à la transpiration témoin ; la fluctuation climatique se trouve ainsi éliminée. Les données sont recueillies dans le tableau 3.

2. *Contrôle en fin de végétation*

Les plantes sont récoltées simultanément lorsque la maturité est jugée suffisante sur l'ensemble de l'essai ; à cette date l'humidité des grains varie entre 35 et 39 p. 100 indépendamment des traitements. Les résultats pour les différents organes sont réunis dans le tableau 4.

Malgré les précautions prises pour diminuer l'hétérogénéité, la variation liée à l'erreur expérimentale est encore très élevée ; l'effet des traitements est cependant suffisamment marqué pour permettre l'interprétation.

TABLEAU 2

Évolution des surfaces foliaires

Age de la plante en jours		33		43		53		63		74		85		95		105
Témoin	S	920		3 280		5 440		7 520		8 840		8 360		7 900		7 620
	ΔS		2 360		2 160		2 080		1 320		— 480		— 460		— 280	
	$\overline{S}$		2 100		4 360		6 480		8 180		8 630		8 130		7 760	
2	S	840		1 450		3 720		non mesuré								
	ΔS		610		2 270											
	$\overline{S}$		1 145		2 585											
3	S			3 120		3 740		non mesuré								
	ΔS				620											
	$\overline{S}$				3 430											
4	S					5 320		5 300		7 080		non mesuré				
	ΔS						— 20		1 780							
	$\overline{S}$						5 310		6 190							
5	S							7 780		7 480		non mesuré				
	ΔS								— 300							
	$\overline{S}$								7 630							

S = Surface foliaire moyenne par plante (cm^2) à chaque contrôle.
ΔS = Variation de S entre deux contrôles.
$\overline{S}$ = Surface moyenne pour chaque période de traitement.

TABLEAU 3

Indice de transpiration des plantes soumises à la sécheresse $\left(= \frac{T_n}{T_1}\right)$ (1)

Traitements	Période								
	33e au 42e jour	43e au 52e jour	43e au 62e jour	63e au 73e jour	74e au 84e jour	85e au 94e jour	95e au 104e jour	105e au 120e j	Durée de l'arrière-action en jours
	2	3	4	5	6	7	8	9	
Témoin	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
2	0,38	0,80	1,01	0,90	0,93	1,05	0,90	0,92	$\leqslant$ 10
3	0,94	0,52	0,89	0,94	0,90	0,92	0,87	0,88	0
4	0,95	1,04	0,40	0,70	0,74	0,80	0,86	0,94	$\leqslant$ 32
5	0,95	1,09	0,96	0,29	0,65	0,81	0,93	0,96	$\leqslant$ 21
6	0,85	1,01	0,94	0,90	0,31	0,69	0,84	1,03	$\leqslant$ 20
7	0,99	1,06	0,97	0,89	0,96	0,31	0,78	0,92	$\leqslant$ 10
8	0,96	1,00	0,89	0,91	0,96	0,93	0,56	0,85	$\leqslant$ 16
9	0,91	1,01	0,93	0,90	0,93	0,88	1,00	0,54	—
10	0,95	0,50	0,32	0,69	0,69	0,79	0,76	0,63	$\leqslant$ 58

(1) T_n = Transpiration des plantes traitées pendant la période n.
T_1 = transpiration du témoin.

La variation liée au hasard peut être estimée à partir des fluctuations entre séries, avant traitement. On admettra ainsi que la transpiration relative est significativement inférieure au témoin lorsqu'elle est $\leqslant$ 0,85.

0,38 = effet direct du traitement.

0,80 = arrière-action significative.

TABLEAU 4

Résultats à la récolte

Traitement n°	Matière sèche par plante en grammes						Teneur en huile (% M. S.)	Huile par plante (grammes)
	Racines	Tiges	Feuilles	Capitules	Grains	Totale		
1	31,46	76,50	35,24	44,06	84,68	271,94	48,92	41,45
2	28,70	68,76	32,90	42,16	80,52	253,04	46,42	37,53
3	28,44	66,14	33,12	34,24	70,60	232,54	45,86	32,64
4	19,92	53,98	30,68	32,64	57,76	194,98	44,66	25,85
5	19,96	60,90	30,82	33,94	60,96	206,58	47,40	29,19
6	28,56	62,42	31,06	31,78	55,16	208,98	50,72	28,14
7	30,84	67,38	34,74	36,14	56,14	225,24	40,76	23,18
8	27,90	69,88	36,32	34,10	65,48	233,68	41,30	26,95
9	27,78	71,86	34,04	34,58	73,64	241,90	46,02	33,73
10	16,72	44,80	28,02	24,64	50,92	165,10	42,36	21,59
Coeff. de variation (en %)	13,0	11,1	9,1	15,0	11,1	8,4	9,9	16,4
Écart-type	± 1,51	± 3,18	± 1,33	± 2,34	± 3,27	± 8,35	± 2,01	± 2,20

Voir en annexe le degré de signification des différences entre traitements.

2. 1. *Période d'incidence de la sécheresse et production.*

Racines.

Leur croissance cesse entre la floraison et la flétrissement des pétales ; à partir de cette date la sécheresse n'a aucune influence sur le poids final de cet organe.

Dans la période qui précède le stade « fleur fanée », le traitement n'a, semble-t-il, touché de façon définitive le développement que pour les localisations dans les 20 jours qui précèdent la floraison ; durant cette période la sécheresse entraîne un blocage des possibilités de développement ultérieur. Plus tôt dans le temps, son influence est sans doute momentanée car on ne retrouve plus de différence avec le témoin au contrôle final.

En nous situant dans un contexte cultural normal, nous pouvons penser que cet effet dépressif direct, très localisé dans le temps, peut se répercuter sur les possibilités d'exploitation et accentuer les conditions de sécheresse ultérieures.

Tiges.

Le poids des tiges — il n'est pas forcément en rapport avec la hauteur des plantes — est significativement abaissé par tous les traitements inclus entre le 40e et le 85e jour de végétation, c'est-à-dire pendant toute la phase active d'accroissement ; l'effet est maximal lorsque la sécheresse se situe entre les 15e jour avant et 10e jour après floraison.

Feuilles.

Comme leur développement, le comportement à la sécheresse des feuilles est tout à fait comparable à celui des racines ; ceci peut être mis en parallèle avec la complémentarité de fonction de ces deux organes.

L'effet dépressif est cependant moins marqué pour les feuilles de sorte qu'un certain déséquilibre entre les deux fonctions pourrait apparaître à la suite d'une sécheresse localisée dans les 20 jours avant floraison, le rapport $\frac{\text{racines}}{\text{feuilles}}$ passant, dans ces conditions, par un minimum.

Période d'incidence de la sécheresse	2	3	4	5	6	7	8	9	Témoin
$\frac{\text{M. S. racines}}{\text{M. S. feuilles}}$ à la récolte	0,87	0,85	*0,64*	*0,64*	0,91	0,88	0,76	0,81	0,89

Cette conclusion reste quelque peu hypothétique car l'équilibre dépend du rapport des surfaces actives et non du rapport des poids ; le tableau 3 nous montre précisément que les traitements 4 et 5 entraînent la nécrose d'une partie des feuilles développées avant traitement ; ce qui tend à maintenir un équilibre apparemment compromis sur la base du poids sec.

Capitules.

L'accumulation de la matière sèche dans le capitule (graines exclues) est régulièrement réduite et de façon importante par tous les traitements appliqués depuis le stade du petit bouton floral de 15 à 20 mm de diamètre jusqu'à la maturité.

Graines.

Quantité. — A partir de la différenciation des ébauches florales (bouton 15 à 20 mm de diamètre) et jusqu'à la récolte, tout déficit de transpiration entraîne une diminution du rendement.

L'effet dépressif est maximal et sensiblement constant pendant les 40 jours qui s'écoulent entre la période de formation des organes floraux — les bractées florales forment alors un feutrage continu visible sous les bractées vertes du bouton — et la pleine coloration de la graine, le capitule atteignant son plein développement. Il s'agit, en gros, des 20 jours qui précèdent la floraison et des 20 jours qui la suivent (fig. 3).

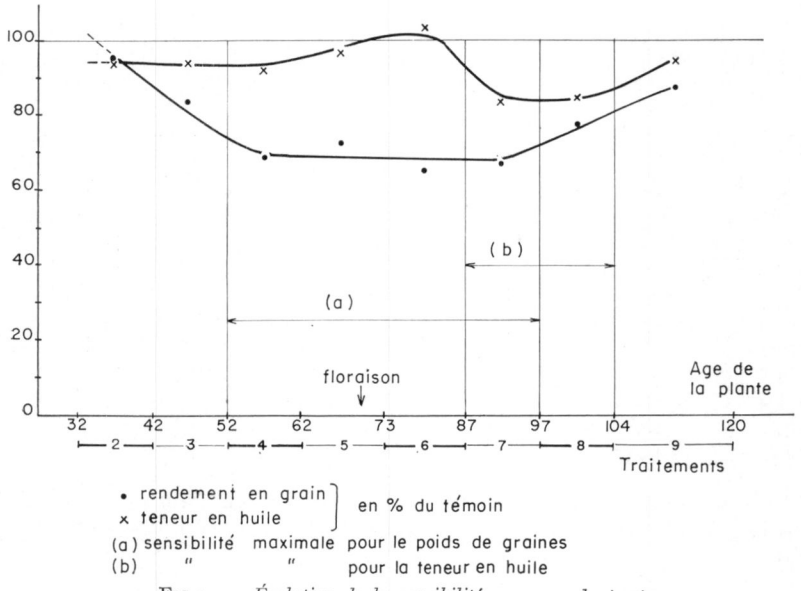


FIG. 3. — *Évolution de la sensibilité au cours du temps*

Bien que l'interprétation à leur niveau devienne délicate, l'analyse des facteurs du rendement semble montrer que le poids de 1 000 grains est abaissé de façon irrégulière et non toujours significative pour toutes les incidences de sécheresse dimi-

TABLEAU 5

Facteur du rendement

Traitements	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	C. V. (%)	σ^e
Poids frais de 1 000 grains en g	123,2	129,0	108,6	105,0	111,2	100,2	106,2	103,6	111,6	95,0	14,5	± 7,05
Nbre de grains par capitule	1 102	1 029	1 095	846	908	895	828	1 007	1 030	868	12,7	± 55

nuant le rendement ; la chute pendant la période de sensibilité maximale est à rattacher plus directement au nombre de grains fertiles (tabl. 5). Ceci met en cause selon les stades du traitement, le flétrissement des organes floraux (périodes 4 et 5), la mauvaise fécondation (périodes 5 et 6) et l'avortement des jeunes graines (période 7) ; dans ce dernier cas le nombre d'enveloppes vides, en particulier au centre du capitule, est assez caractéristique.

Qualité. — La teneur en huile est beaucoup moins touchée que le poids de grains lui-même ; on relève cependant un effet dépressif assez net pour les deux périodes (20 jours) qui suivent la fin de la fécondation. Ce laps de temps correspond d'ailleurs à la phase d'accumulation accélérée de l'huile (tabl. 6).

TABLEAU 6

Évolution de la teneur en huile du témoin

Date	Poids frais de grain (g par plante)	Huile (% poids frais)	Poids d'huile (g par plante)	Vitesse d'accumulation de l'huile (g/plante/jour)
2-8	122,1	non dosable	traces	} # 2,0
12-8	143,0	14,6	20,8	
22-8	141,0	25,2	35,5	} # 1,5
8-9	134,3	30,9	41,5	} # 0,4

Matière sèche totale.

La production globale à la récolte est dans l'ensemble d'autant plus réduite que la sécheresse s'est située dans une période d'intense accroissement (comparaison tabl. 4 et 8).

2. 2. *Action conjuguée de deux traitements = Prolongation de la sécheresse.*

Parmi les diverses combinaisons de traitements, nous n'avons retenu, pour des raisons matérielles, qu'une seule permettant de noter l'action cumulative de deux périodes de sécheresse consécutives ; ce traitement (10) est à comparer aux conditions 3 et 4.

On voit d'abord que pour tous les organes, de la racine à la graine, les rendements du traitement 10 sont inférieurs à chacun des rendements des traitements 3 et 4 ; les différences ne sont significatives dans les deux cas que pour la tige et le capitule. La matière sèche produite au total est, bien entendu, très fortement diminuée.

La morphologie de la plante est perturbée de façon appréciable surtout en ce qui concerne le nombre de feuilles actives à la récolte et la taille ; la hauteur sous capitule est en moyenne de 145 cm pour 174 cm dans le reste de l'essai.

En ce qui concerne la teneur en huile, on voit apparaître pour le traitement 10 un écart significatif avec le témoin bien alimenté alors que chacun des deux traitements élémentaires 3 ou 4 n'en était pas distinct.

Si l'on compare maintenant les effets 10 avec l'addition des effets 3 et 4 (tabl. 7), on reconnaît que les deux séries de valeurs sont très proches l'une de l'autre sauf, peut-être, pour le grain ; il n'est pas possible d'estimer la signification de cette observation. Compte tenu de l'imprécision de cet essai on admettra simplement que l'hypothèse de l'additivité des effets n'est pas infirmée.

TABLEAU 7

Comparaison des effets 3 et 4 aux effets 10

	Déficits de rendement en g			
	3	4	3 + 4	10
Racines	3,02	11,54	14,56	14,74
Tiges	10,36	22,52	32,88	31,70
Feuilles	2,12	4,56	6,68	7,22
Capitule	9,82	11,42	21,24	19,42
Grains	14,08	26,92	41,00	33,76
Total	39,40	76,96	116,36	106,84

III. — DISCUSSION

Le résultat à la récolte reflète l'action globale du traitement ; celle-ci peut se décomposer en une action directe de la sécheresse sur la croissance dans la période d'application et une action indirecte correspondant aux séquelles anatomiques ou physiologiques du choc après rétablissement des conditions normales. Ces deux actions pouvaient normalement être distinguées en suivant l'accroissement de poids sec pendant et après chacune des interventions, mais ceci conduisait à un dispositif expérimental excessivement lourd. Le seul indice d'évolution au cours du temps dont nous disposons est la transpiration par plante (tabl. 2).

Examinons dans les lignes qui suivent l'aide que peut nous apporter cet élément de contrôle.

1. *Transpiration et croissance*

Nous avons montré (M. ROBELIN, 1962) que, toutes choses égales par ailleurs, photosynthèse et transpiration restent dans un rapport constant lorsque les conditions d'alimentation en eau s'altèrent, mais pour l'instant, nous ne savons pas si cette proportionnalité entre croissance et transpiration est valable lorsque les plantes, placées en condition hydrique normale, ont subi auparavant des conditions différenciées. Pour utiliser la transpiration comme indice d'activité photosynthétique nous devons au préalable démontrer la validité de la relation entre ces deux termes pour toute condition de l'essai.

L'hypothèse de proportionnalité nous conduit à calculer pour chaque traitement la matière théoriquement élaborée au cours de chaque période, à faire la somme de ces accroissements théoriques et à comparer les valeurs obtenues aux valeurs réelles contrôlées à la récolte.

Nous disposons pour cela des transpirations T_n et des rapports

$$\frac{\text{accroissement de matière sèche}}{\text{transpiration}}$$

mesurés sur lot témoin au cours de la croissance (tabl. 8).

TABLEAU 8

Efficience de l'eau au cours de la croissance normale

Périodes	2	3	4	5	6	7	8	9
Age en jours	33 à 42	43 à 52	53 à 62	63 à 73	74 à 84	85 à 94	95 à 104	105 à 120
T = transpiration témoin litre	5,477	8,079	9,570	13,701	15,818	14,749	7,878	6,698
P = accroissement poids sec g	20	27	38	55	49	38	27	12
Efficience de l'eau $\frac{P}{T}$ gl^{-1}	3,65	3,34	3,97	4,01	3,10	2,58	3,42	1,79

La matière sèche produite par les plantes ayant subi le traitement n serait selon l'hypothèse égale à :

matière sèche au départ de l'essai $+ \left(\frac{P}{T}\right)_2 T_{n2} + \left(\frac{P}{T}\right)_3 T_{n3} + \cdots + \left(\frac{P}{T}\right)_9 T_{n9}$

avec

matière sèche au départ = 6 g (donnée mesurée)

T_{ni} = Transpiration du traitement n pendant la période i.

TABLEAU 9

Valeurs calculées et observées de la matière sèche produite

Traitements	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-calculées	244,10	237,59	206,79	205,89	211,88	230,99	243,57	248,11	181,06
2-observées ...	253,04	233,02	194,98	206,58	208,98	225,24	232,54	241,90	165,10
1-2.....	— 8,94	+ 4,57	+ 11,81	— 0,69	+ 2,90	+ 5,75	+ 11,03	+ 6,21	+ 15,96
Erreur rel. (%).	3,5	2,0	6,1	< 1	1,4	2,6	4,8	2,6	9,7

Dans le tableau 9 on pourra comparer le résultat de ces calculs aux valeurs mesurées ; l'erreur commise par calcul est inférieure ou égale à 6 p. 100 pour tous les traitements simples (2 à 9) ; elle atteint 10 p. 100 par excès pour le traitement cumulé (10) ; mais dans ce cas la morphologie du tournesol est très altérée (voir § II, 2.2) ; les conditions physiques d'échange aux surfaces sont donc notablement modifiées et la transposition des coefficients d'efficience de l'eau incorrecte.

Nous pouvons conclure : *aussi longtemps que la morphologie de la plante n'est pas « trop » changée, les modifications de transpiration sont l'image des modifications de photosynthèse.*

Il en résulte :

a) que la réduction de transpiration imposée équivaut à une réduction analogue d'élaboration de matière sèche dans la période considérée ;

b) que les arrière-actions de la sécheresse, décelées par la transpiration, peuvent de même s'interpréter en terme de croissance.

En nous reportant au tableau 2 nous voyons par exemple que la durée du ralentissement d'activité varie selon les dates d'application de la sécheresse ; elle peut atteindre la valeur maximale d'un mois pour une carence en eau située peu avant la floraison ; plus tôt, le rétablissement est assez rapide, 10 jours au plus ; plus tard, le temps requis pour le retour à une activité normale diminue peu à peu.

Dans le cas d'une sécheresse prolongée sur 20 jours dans la période de sensibilité maximale (trait. 10), le potentiel de croissance semble définitivement réduit.

2. *Modalité d'action de la sécheresse en cours de traitement et après traitement*

Si, au cours d'une période de croissance donnée :

T est la transpiration par plante,

P la photosynthèse nette par plante,

$\bar{S}$ la surface foliaire moyenne,

$\frac{T}{\bar{S}} = t$ transpiration moyenne ramenée à l'unité de surface de feuille ;

on peut écrire d'après ce que nous avons vu en III.-1.

$$\frac{T(\text{traité})}{T(\text{témoin})} = \frac{P(\text{traité})}{P(\text{témoin})} = ag \text{ (indice d'activité globale du traité)}$$

on peut écrire également $ag = \dfrac{(t \times \bar{S})\ \text{traité}}{(t \times \bar{S})\ \text{témoin}} = a.\ s$

avec $a = \dfrac{t\ \text{traité}}{t\ \text{témoin}}$ = indice d'activité par unité de surface

et $s = \dfrac{\bar{S}\ \text{traité}}{\bar{S}\ \text{témoin}}$ = indice de surface.

L'expérience permettant de déterminer directement *ag* (tabl. 3) et *s* (tabl. 2) on peut en déduire *a* (tabl. 10). Nous sommes ainsi en mesure d'apprécier l'importance relative des modifications subies par chacun des « postes » surface et activité par unité de surface, de la photosynthèse nette.

TABLEAU 10

Indices d'activité globale a.g, de surfaces et d'activité par unité de surface a

Traitements	En cours de traitement			Après traitement		
	a. g.	*s.*	*a.*	*a. g.*	*s.*	*a.*
2	0,38	0,54	0,70	0,80	0,58	1,38
3	0,52	0,77	0,68			
4	0,40	0,82	0,49	0,70	0,76	0,92
5	0,29	0,93	0,31			

En cours de traitement.

On suit les évolutions nettement opposées de l'indice de surface (*s*) et de l'indice d'activité (*a*) selon l'âge de la plante au moment du traitement. Le phénomène de réduction de surface diminue en importance à mesure que la sécheresse intervient plus tardivement alors que *a* devient peu à peu le facteur essentiel. Ainsi à l'échelle de temps considéré, le ralentissement du développement foliaire constitue un mode d'adaptation venant se superposer et se substituer en partie à la régulation stomatique, tout au moins dans les premières phases de croissance.

Après traitement.

Les deux contrôles effectués en arrière-action montrent que la réduction de l'activité globale est due, pour l'essentiel, à la diminution de surface foliaire ; l'activité par unité de surface, qui traduit en définitive un état physiologique, n'est pas altérée ; on observe au contraire une augmentation importante de l'indice correspondant après le traitement 2 ; ce phénomène reflète vraisemblablement l'âge moyen moins avancé des feuilles (nécrose des feuilles âgées, ralentissement de la croissance des feuilles dernières formées).

Il est probable que l'arrière-action après les traitements plus tardifs est liée également à la réduction de surface foliaire active, sa durée s'expliquant par le temps nécessaire à l'égalisation des surfaces avec le témoin dont les feuilles les plus âgées se dessèchent peu à peu (tabl. 3).

CONCLUSION

Il se confirme dans cet essai que tout ralentissement de transpiration, dans un contexte climatique donné, est l'image exacte d'un ralentissement de photosynthèse, tout au moins aussi longtemps que la cause de la chute de transpiration n'entraîne pas une modification importante de la morphologie.

Un indice de transpiration, par exemple $\frac{\text{transpiration réduite}}{\text{transpiration normale}}$, peut être considéré comme un indice de croissance.

A intensité de sécheresse constante, les différentes localisations dans le temps de la carence en eau auront donc des répercussions analogues sur l'accroissement de poids sec ; elles se distinguent par leurs arrière-actions plus ou moins prolongées. Il semble d'ailleurs que le post-effet du traitement puisse s'expliquer à partir de la diminution de la surface de feuilles actives plutôt que par une modification d'ordre physiologique.

Les conclusions pratiques de cette étude ne peuvent pas s'exprimer selon un schéma aussi simple, la répartition des produits de synthèse et l'altération de l'état hydrique de la plante touchant diversement les différents organes selon la phase de développement.

Pour obtenir la production de grains maximale il est nécessaire de maintenir une bonne alimentation en eau dès que les organes floraux sont différenciés ; macroscopiquement cette étape du développement est caractérisée par un diamètre du bouton floral compris entre 1,5 à 2 cm. On peut préciser que la sécheresse est particulièrement dommageable pour le tournesol dans les 40 jours qui encadrent la floraison ; durant cette période un déficit hydrique de 10 jours peut entraîner une diminution de récolte chiffrée à 30 ou 35 p. 100.

Un tel comportement est assez différent de celui du maïs (ROBELIN, 1963) ; on ne retrouve pas de phase particulièrement critique et de courte durée ; par contre la sensibilité se maintient durant 80 jours sur les 120 jours de végétation. La conduite des irrigations sur le tournesol sera donc moins délicate mais plus astreignante.

Vue sous l'aspect de la qualité, l'influence néfaste de la sécheresse est notable dans les 20 jours qui suivent la fanaison de la fleur ; elle se traduit ici par une pénalisation de 7 à 8 points dans la teneur en huile. Si nous rapprochons les réactions de la plante en quantité et qualité, la première décade après flétrissement des pétales serait la plus importante.

Reçu pour publication en décembre 1967.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement M. P. LECLERC, de la Station d'Amélioration des Plantes de Clermont-Ferrand, qui nous a fourni le matériel végétal utilisé dans cet essai.

Nos remerciements vont également à MM. BLANCHET, HALLAIRE et HÉBERT qui ont bien voulu nous guider de leurs conseils pour la rédaction de cet article.

ANNEXE

Signification des différences entre les moyennes de chaque traitement. Méthode des rangs multiples de Duncan. Deux moyennes non réunies par une ligne sont significativement différentes au seuil 0,05.

a) *Racines*

Traitements n°	1	7	2	6	3	8	9	5	4	10
	31,46	30,84	28,70	28,56	28,44	27,90	27,78	19,96	19,92	16,72

b) *Tiges*

Traitements n°	1	9	8	2	7	3	6	5	4	10
	76,50	71,86	69,88	68,76	67,38	66,14	62,42	60,90	53,98	44,80

c) *Feuilles*

Traitements n°	8	1	7	9	3	2	6	5	4	10
	36,32	35,24	34,74	34,04	33,12	32,90	31,06	30,82	30,68	28,02

d) *Capitule*

Traitements n°	1	2	7	9	3	8	5	4	6	10
	44,06	42,16	36,14	34,58	34,24	34,10	33,14	32,64	31,78	24,64

e) *Graines*

Traitements n°	1	2	9	3	8	5	4	7	6	10
	84,68	80,52	73,64	70,60	65,48	60,96	57,76	56.14	55,16	50,92

f) *Matière sèche totale*

Traitements n°	1	2	9	8	3	7	6	5	4	10
	271,94	250,02	241,12	233,68	232,54	225,24	208,98	207,12	194,98	165,10

g) *Teneur en huile*

Traitements n°	6	1	5	2	9	3	4	10	8	7
	50,72	48,92	47,40	46,42	46,02	45,86	44,66	42,36	41,30	40,76

h) *Nombre de graines fertiles par capitule*

Traitements n°	1	3	9	2	8	5	6	10	4	7
	1 102	1 095	1 030	1 029	1 007	908	895	868	846	828

i) *Poids de 1 000 grains à la récolte*

Traitements n°	2	1	9	5	3	7	4	8	6	10
	129,0	123,2	111,6	111,2	108,6	106,2	105,0	103,6	100,2	95,0

SUMMARY

EFFECTS AND AFTER-EFFECTS OF DROUGHT ON THE GROWTH AND YIELD OF SUNFLOWER

Cultivating individually sunflower plants whilst controlling their water supply at the self-same evaporative capacity, the author goes into the behaviour of the plant in relation to the time the drought occurs, and shows that the yield of sunflower seeds drops as from the time of incipient budding, such drop being more marked within the forty days encompassing blossoming time.

More generally speaking, under the test conditions, it appears that the yield of dry matter, during and after the treatment, follow the same relative fluctuations as transpiration of the plant, the relative transpiration thus providing a useful growth index. The after-effects of the drought do not originate from a purely physiological change but from decreased exchange areas.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG UND NACHWIRKUNG DER TROCKENHEIT
AUF DAS WACHSTUM UND DIE ERZEUGUNG
DER SONNENBLUME

An Hand isoliert kultivierter Sonnenblumen, die alle einem gleichmässigen Verdunstungsvermögen bei steter Ueberwachung ihrer Wasserstoffversorgung ausgesetzt wurden, untersucht der Verfasser das Verhalten der Pflanze in Abhängigkeit von der Periode der Trockenheitslokaliesierung. Insbesondere zeigt er, dass die Körnererzeugung durch jede Trockenheit herabgesetzt wird, die von der Differenzierung der Blütenansätze ab einsetzt. Die Wirkung ist ausgeprägter in den 40 Tagen um die Blütezeit.

Noch allgemeiner gesehen erscheint es, unter den Bedingungen des Versuches, dass die vor und nach der Behandlung erzeugte Trockenmasse dieselben relativen Schwankungen als die Ausdünstung erfährt. Deshalb, stellt die relative Ausdünstung einen guten Wachstumsindex dar. Die Nachwirkungen der Trockenheit lassen sich durch eine Verringerung der Austauschflächen und nicht durch eine Veränderung physiologischer Art erklären.

РЕЗЮМЕ

Действие и пле-действие засухи на рост и продуктивность подсолнечника.

М. РОБЕЛЭН

Автор выращивал отдельные растения подсолнечника, поддерживая их водное питание на одинаковом для всех растений уровне мощности испарения и анализировал их поведение, в зависимости от локализации периода засушливости.

Результаты опытов показывают, что начиная с дифференциации цветочных зачатков, каждый засушливый период ослабляет зерновую продукцию растений; эффект этот наиболее силен в течении 40 дней включающих период цветения.

В плане более общем, было выявлено, что в условиях опыта, продукция сухого вещества проходит через те-же колебания что и транспирация, во время, и по окончании периода искуственной засухи. Таким образом, транспирация является хорошим признаком роста. После-действие об'ясняется значит, не повреждениями физиологического порядка, но уменьшением площади обмена.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOUCHET R. J., 1963. Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. *L'eau et la Production végétale*, 151-231. I. N. R. A., Paris.

CHARTIER Ph., HALLAIRE M., 1967. Photosynthèse de la feuille et du couvert végétal : influence particulière de l'alimentation hydrique : Czechoslovak National Comite of the International Commission on Irrigation and drainage. *Internation. Soil Water. Symp.*

DUNCAN D. B., 1955. Multiple range and multiple F tests. *Biometrics*, **11**, 1-42.

FEODOROFF A., 1966. Brevet Institut national de la Propriété industrielle, 12 juil. 1966 ; n° provisoire 69.135.

De LIS B. R., PONCE I., TIZIO R., 1964. Studies on water requirements of horticultural crops. I. Influence of drought at different growth stages of Potato on the tuber yield. *Agron. J.*, **56**, p. 381.

MÉRIAUX Mme S., 1963. Essai d'interprétation des mesures de pression de succion des feuilles. *L'eau et la Production végétale*, 349-356. I. N. R. A., Paris.

PARCEVAUX S., de 1963. Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. *L'eau et la Production végétale*, 63-150. I. N. R. A., Paris.

RAMADHAR SINGH, ALDERFER R. B., 1966. Effect of soil moisture stress at different periods of growth of some vegetable crop. *Soil Sci.*, **101**, p. 69.

READ D. W. L., 1962. Self irrigating greenhouse pots. *Agron. J.*, **54**, p. 467.

ROBELIN M., 1962. Évapotranspiration réelle des différents couverts végétaux bien alimentés en eau et Évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **13**, 493-522.

ROBELIN M., 1962. Rapports entre augmentation de poids sec et transpiration en conditions de sécheresse. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 718-720.

ROBELIN M., 1963. Contribution à l'étude du comportement du Maïs grain vis-à-vis de la sécheresse. *Journées Internationales de l'Irrigation*, 69-76. Édit. par Association générale des Producteurs de Maïs. Pau.

SALTER P. J., 1963. The effect of wet or dry soil conditions at different growth stages on the components of yield of a pea crop. *J. hortic. Sci.*, **38**, 321-324.

TANNER C. B., PATERSON A. E., LOVE J. R., 1960. Radiant energy exchange in a corn field. *Agron. J.*, **52**, 373-379.

Ann. agron., 1967, **18** (6), 601-621.

BILANS DE POTASSIUM ET ALIMENTATION POTASSIQUE DES PLANTES EN PRÉSENCE DE RÉTROGRADATIONS ET DE LIBÉRATIONS D'IONS K^+ NON ÉCHANGEABLES

R. BLANCHET et M. BOSC

avec la collaboration technique de N. GELFI

Station d'Agronomie et d'Œnologie, 67 boulevard Deltour, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

La dynamique du potassium et l'alimentation potassique des plantes sont étudiées dans des sols très différents, en l'absence de fumures potassiques et en présence d'apports très copieux de potassium. Selon les conditions réalisées, il se produit d'importantes libérations ou rétrogradations d'ions K^+. Celles-ci sont comparées d'une part aux tests de laboratoire, d'autre part aux bilans totaux de potassium (fumures-exportations) ; l'ensemble des données met en évidence divers types de comportements des sols. Les conséquences en sont discutées, ainsi que les implications relatives à la fertilisation.

INTRODUCTION

La sélection variétale, l'augmentation des rendements et l'extension de cultures exigeantes telles que les prairies temporaires, certains oléagineux, les productions légumières..., font apparaître des besoins en potassium des plantes de plus en plus élevés. Il n'est pas rare en effet que ces besoins atteignent plusieurs centaines de kilogrammes par hectare et par an, notamment lorsque les cultures sont irriguées. Par contre, les restitutions par les résidus des récoltes sont également importantes dans certains cas (oléagineux, céréales).

Les prélèvements et apports de potassium revêtent donc une ampleur croissante, et les notions classiques de « niveau optimum de réserves », de « sol bien pourvu », tendent à s'estomper : un niveau peut être convenable pour une céréale, mais très insuffisant pour une prairie temporaire. La fertilisation potassique doit donc être conçue au moins autant en fonction des besoins de la culture que des réserves du sol.

Ces faits se traduisent par d'importantes fluctuations annuelles du stock d'ions K^+ présumés disponibles pour les plantes, et, ainsi que l'ont souligné AUDIDIER et *al.* (1962), des rétrogradations (1) et libérations sont susceptibles d'intervenir largement dans le sol. Très appréciables à l'échelle de la composition moyenne de la terre, puisque les quantités de potassium mises en jeu peuvent dépasser 100 p. p. m. de sol, ces phénomènes sont probablement beaucoup plus accusés au voisinage immédiat des granules d'engrais (fixations) ou des zones absorbantes des racines (libérations).

Il est donc particulièrement important de prévoir l'ampleur et la vitesse de ces rétrogradations et libérations, ainsi que leurs relations avec les teneurs en potassium échangeable, et leurs répercussions sur l'alimentation des végétaux. Tout le problème de la dynamique des ions K^+ dans le système sol-solution-plante est ainsi posé, et la présence fréquente de minéraux illitiques et micacés le rend particulièrement ardu (BLANCHET et *al.*, 1962, 1965). Ce problème était surtout envisagé à long terme lorsque les besoins des cultures étaient plus faibles ; il prend maintenant une dimension annuelle, et peut-être même beaucoup moindre si l'alimentation des plantes s'effectue surtout grâce aux particules de sol situées au voisinage immédiat des racines, comme on tend de plus en plus à le penser.

C'est cet ensemble de caractères de la dynamique du potassium que nous avons tenté d'explorer dans quelques types de sols de la région toulousaine, en considérant à la fois les propriétés des sols, l'alimentation des plantes, et les bilans de potassium obtenus dans diverses conditions.

I — MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. *Sols étudiés*

Ces sols représentent les deux principaux types rencontrés dans la région toulousaine :

— sols argileux, souvent légèrement calcaires, peu évolués, formés sur molasses tertiaires (BOSC et al., 1962 ; MAYEUX, 1961) ;

— sols limono-sableux lessivés sur alluvions anciennes de la Garonne et de ses affluents (LIWERANT, 1941 ; MARTY et FIORAMONTI, 1965),

Les échantillons utilisés dans cette étude ont été décrits par ailleurs de manière détaillée (BLANCHET et al., 1966) ; leurs principaux caractères concernant la dynamique du potassium sont indiqués par le tableau 1. Les teneurs en K des argiles indiquent la présence de phyllites micacées ou illitiques, que l'on rencontre également dans les particules de diamètre supérieur à 2 μ. Les diagrammes de diffraction des rayons X confirment ces faits ; les micas sont d'ailleurs souvent apparents dans ces sols. L'appréciation de la nature des argiles a été effectuée d'après les diagrammes de diffraction des rayons X, les capacités d'échange de cations, les surfaces adsorbantes et les analyses chimiques, selon des techniques précédemment exposées (BLANCHET et *al.*, 1965).

Les essais ont porté sur 29 échantillons, représentant soit la terre arable, soit le sous-sol situé immédiatement au-dessous, susceptible d'être largement exploré par les racines. Nous ne rapporterons ici que les résultats relatifs aux échantillons les plus caractéristiques de cet ensemble de terres. Les fumures potassiques apportées habituellement dans ces sols sont faibles, sauf dans le cas du n° 28, copieusement fumé.

(1) Le terme français « rétrogradation » est équivalent au mot anglais « fixation » ; leur signification est identique, c'est-à-dire passage d'ion K^+ à un état actuellement non échangeable, cela n'impliquant d'ailleurs pas un blocage définitif.

TABLEAU I

Principaux caractères des sols étudiés

Type de sol	Profondeur cm	Argile % de terre	C. E. C. méq./kg	K total % de terre	K % d'argile	K échangeable	Nature des argiles*					
							Kaol	Chl	Ill	Mont	Min. G.	Qu
Argileux												
6	0-25	33,5	235	2,37	2,20	150	20		40		40	
7	25-50	36,2	290	2,33	2,05	163	20		40		40	
8	0-25	29,4	173	2,53	2,40	140	20		50		30	
9	25-50	26	172	2,67	2,46	99	20		50		30	
28	0-25	35	—	2,51	2,89	379	10		60		30	
29	25-50	42,5	—	2,45	2,81	253	10		60		30	
Limoneux												
10	0-25	11	41,5	1,52	2,34	132	20	30	45	tr.		tr.
11	25-50	19	107	1,56	2,08	76	20	25	40	10		tr.
12	0-25	9,8	55	1,42	2,53	40	20	25	50	tr.		tr.
13	25-50	13,1	63	1,51	2,25	29	20	25	50	tr.		tr.
14	0-25	13,2	74	1,07	2,10	55	25	20	40	10		tr.
15	25-50	14,7	70	1,10	1,82	33	20	25	40	10		tr.

(*) Kaol = Kaolinite ; Chl = Chlorite ; Ill = Illites ou Micas ; Mont = Montmorillonite ; Min. G. = Minéraux Gonflants, probablement interstratifiés illite-montmorillonite : feuillets # 12 A, surface 600-800 m²/g, C. E. C. 0,6 à 1 méq./g ; Qu = Quartz.

2. *Tests de laboratoire*

— Les teneurs en potassium échangeable ont été déterminées au moyen de percolations fractionnées d'une solution normale et neutre d'acétate d'ammonium, en contrôlant que, aux valeurs retenues pour « K échangeable », cette solution n'extrayait plus que des quantités infimes d'ions K^+.

— L'aptitude des sols à la rétrogradation a été appréciée à l'aide de la méthode de VAN DER MAREL et VENEKAMP (1955), par voies sèches et humides.

— La libération d'ions K^+ initialement non échangeables était provoquée par l'effet bien connu du tétraphénylborate de sodium (DUTHION, 1966 ; ROBERT et PEDRO, 1966) dans les conditions suivantes : à 1 g de terre finement broyée, addition de 1 méq TPBNa dissous soit dans l'eau pure, soit dans une solution N de chlorure de sodium (l'addition de ClNa renforce beaucoup l'action de TPBNa, comme l'indique le tableau 3). Après des durées d'agitation variant de 15 minutes à 3 jours, la réaction était bloquée par un excès d'acétate d'ammonium (5 méq), et le potassium extrait était dosé selon la technique de SCHULTE et COREY (1963).

3. *Cultures en vases de végétation*

a) Les divers sols étudiés ont été soumis à deux cultures successives d'orge, en vases de végétation renfermant 7 kg de terre. Les plantes recevaient des quantités largement suffisantes de tous les éléments autres que K. Deux traitements concernant le potassium ont été pratiqués :

— aucun apport de K au cours des deux cultures successives ;

— apport de 300 p. p. m. K à la première culture, et nouvel apport de 600 p. p. m. K à la seconde.

Les échantillons se sont trouvés ainsi soit très appauvris, soit très enrichis, de manière à provoquer des libérations ou des rétrogradations abondantes. A titre indicatif, signalons que les productions de matière sèche et les quantités de potassium absorbées par les plantes dans ces essais en vases de végétation sont environ quatre fois plus élevées qu'au champ (facteur eau non limitant, température et éclairement plus élevés...).

Après chacune des récoltes, le potassium absorbé par l'orge a été déterminé, ainsi que la teneur des sols en potassium échangeable ; les bilans faisant apparaître les libérations ou rétrogradations ont été calculés.

b) D'autre part, un épuisement en petits vases de végétation a été réalisé par une culture de ray-grass soumise à huit coupes successives, selon la technique de CHAMINADE (1960) ; les libérations obtenues ont été calculées d'après les quantités de potassium absorbées et les teneurs finales en K échangeable.

II — RÉSULTATS OBTENUS

1. *Alimentation potassique des plantes et évolution des teneurs en potassium échangeable*

Le tableau 2 indique, pour quelques sols-types, les productions de matière sèche, les quantités de potassium absorbées par les deux récoltes successives d'orge, et l'évolution des teneurs en potassium échangeable. Quelques faits apparaissent immédiatement :

— en l'absence de fumure potassique, la première culture a absorbé, en sol limoneux, beaucoup plus de potassium que ne le laissaient prévoir les faibles teneurs en ions K^+ échangeables. Ce résultat est dû à d'importantes libérations de potassium initialement non échangeable. Conformément à des observations décrites par ailleurs (BLANCHET, BOSC, 1966), ces libérations ont été rapides mais peu soutenues,

TABLEAU 2

Principaux résultats obtenus au cours des deux cultures successives d'orge

Types de sols	1re culture					2e culture			
	K éch. initial p. p. m.	K apporté p. p. m. de sol	Mat. sèche produite g/pot	K absorbé p. p. m. de sol	K éch. final p. p. m. de sol	K apporté p. p. m. de sol	Mat. sèche produite g/pot	K absorbé p. p. m. de sol	K éch. final p. p. m. de sol
Argileux									
6	150	0	123	129	173	0	81	86	93
		300	134	322	195	600	118	402	153
7	163	0	114	97	186	0	79	88	95
		300	132	227	200	600	113	396	150
8	140	0	135	156	140	0	68	71	83
		300	149	330	155	600	94	375	160
9	99	0	96	69	135	0	54	55	84
		300	123	223	149	600	109	393	122
28	379	0	150	414	338	0	123	118	175
		300	150	436	393	600	110	400	360
29	253	0	137	154	246	0	110	118	165
		300	139	279	255	600	120	412	215
Limoneux									
10	132	0	98	181	53	0	35	46	33
		300	106	332	120	600	72	368	332
11	76	0	71	51	60	0	22	20	34
		300	91	239	126	600	67	324	352
12	40	0	100	88	34	0	18	15	28
		300	118	291	65	600	74	356	193
13	29	0	101	197	55	0	44	42	35
		300	108	357	120	600	76	358	278
14	55	0	116	113	45	0	27	29	30
		300	121	319	73	600	73	347	220
15	33	0	114	216	78	0	57	58	45
		300	112	339	111	600	74	347	265

puisque le même phénomène ne se reproduit guère au cours de la seconde culture. Les échantillons de sols argileux présentent un comportement beaucoup plus classique.

— Ces libérations de potassium initialement non échangeable sont souvent intervenues sans que l'on observe une diminution marquée des quantités échangeables, surtout au cours de la première culture. Quelquefois, une légère augmentation apparaît même ; celle-ci peut être due à l'accroissement de la concentration en électrolytes dans le milieu, provoquée par l'apport de l'ensemble des éléments nutritifs.

— En présence de fumures, l'alimentation potassique est sensiblement la même dans tous les cas ; grâce à sa très grande « plasticité », l'orge s'est considérablement enrichie en K, principalement dans les pailles.

— Au cours de la première culture, les plantes avaient absorbé, en présence de fumures, des quantités de potassium du même ordre que les apports, et les rétrogradations étaient peu importantes. Celles-ci sont surtout apparues avec les très fortes fumures de la deuxième culture ; elles sont beaucoup plus marquées dans les sols argileux, qui s'enrichissent peu en ions K^+ échangeables, contrairement aux sols limoneux.

Dans l'ensemble de ces sols, l'alimentation des plantes n'a donc guère été liée aux teneurs initiales en potassium échangeable. Par contre, les processus de rétrogradation et surtout de libération ont revêtu une grande ampleur, et nous les examinerons de manière plus détaillée.

2. *Comparaison des rétrogradations et libérations obtenues au cours des cultures et des tests de laboratoire*

La figure 1 représente, en fonction des teneurs initiales des sols en potassium échangeable, les fixations et libérations d'ions K^+ obtenues d'une part sur l'ensemble des deux cultures d'orge, d'autre part au cours de certains tests de laboratoire, dont les résultats détaillés figurent sur le tableau 3. Pour faciliter les comparaisons, nous avons seulement indiqué sur le graphique 1 les rétrogradations obtenues selon la technique de VAN DER MAREL par voie humide, et les libérations provoquées par le tétraphénylborate de sodium en trois jours, sans adjonction de chlorure de sodium. Ces deux catégories de données sont en effet bien représentatives de l'ensemble des études de fixation et de libération, et les techniques mises en œuvre sont les plus proches des conditions culturales.

Ainsi que l'indique la figure 1, les ordres de grandeurs des résultats obtenus par ces tests d'une part, et après les cultures d'autre part, présentent d'ailleurs une bonne concordance sur la plupart des sols argileux (nº 6, 7, 8, 9, 29). Par contre, ils sont nettement discordants, en ce qui concerne les libérations d'ions K^+, sur les sols limoneux (nº 13 et 15 surtout). Les techniques chimiques d'extraction utilisées avec succès dans d'autres milieux n'ont pas permis, sur ces sols, de retrouver le comportement observé en présence des plantes. Les équilibres d'échange jouent en effet un rôle important dans ces phénomènes (BLANCHET et BOSC, 1966 *a* et *b*), et ce point sera discuté ci-dessous.

Remarquons enfin, sur la figrue 1, que l'ampleur des rétrogradations ou libérations observées ne présente pas de relation générale avec les teneurs en K échangeable. Ce résultat n'est pas surprenant, puisque ces deux processus inverses dépendent essentiellement de la nature des minéraux du sol (SCHUFFELEN et VAN DER MAREL, 1955). La différence entre les fumures et les exportations des cultures a déterminé le sens du phénomène (fixation ou libération), dont nous examinerons maintenant les modalités et la réversibilité.

TABLEAU 3

Principaux caractères de rétrogradation et de libération du potassium, dans les sols étudiés

Sols	K échangeable, ppm de sol	K fixé, % de K apporté		K non échangeable libéré, p. p. m. de sol			
				Tétraphénylborate de sodium			*Ray-grass* (8 coupes)
		voie humide	voie sèche	Sans ClNa, 3 jours	Avec ClNa 15 mn	Avec ClNa 3 jours	
Argileux							
6	150	24	53	160	200	2 370	491
7	163	40	65	157	227	3 120	333
8	140	19	50	135	196	2 250	563
9	99	32	65	121	184	2 700	176
28	379	5	33	436	570	2 730	744
29	253	42	69	166	372	3 030	268
Limoneux							
10	132	3	18	93	94	700	190
11	76	8	40	74	87	1 230	63
12	40	6	22	50	47	570	113
13	29	6	29	46	48	710	350
14	55	4	19	35	70	620	215
15	33	6	31	20	44	500	353

3. *Relations entre les bilans de potassium échangeable (rétrogradations et libération) et les bilans totaux de potassium (fumures et exportations)*

De nombreux travaux ont montré que les minéraux micacés altérés sont susceptibles, dans une large mesure, de s'enrichir ou de s'appauvrir en ions K^+ interfeuillets (MORTLAND, 1961 ; RAMAN et JACKSON, 1965). Lorsqu'ils revêtent une ampleur suffisante, ces processus de fixation ou de libération sont généralement accompagnés d'une modification de l'hydratation des minéraux, bien décelable sur les diagrammes de diffraction des rayons X (ex. BLANCHET et *al.*, 1965). « L'ouverture » et la « fermeture » que présentent ces argiles, selon les extractions ou les additions de potassium, laissent supposer un large degré de réversibilité de ces fixations et libérations.

Sur le plan agronomique, AUDIDIER et *al.* (1962) ont particulièrement étudié les conséquences de ces phénomènes et nous utiliserons une représentation très voisine

de celle qu'ils ont adoptée (la modification consiste seulement en une inversion des signes, faisant apparaître les fixations en termes négatifs et les libérations en termes positifs). Le principe en est le suivant :

a) On calcule, de même que pour la figure 1, les bilans de potassium indiquant les fixations ou libérations d'ions K^+, d'après la relation suivante :

$$\text{Bilan B} = \begin{bmatrix} \text{K exporté par les plantes} \\ + \text{ K échangeable final} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{K échangeable initial} \\ + \text{ fumure} \end{bmatrix}$$

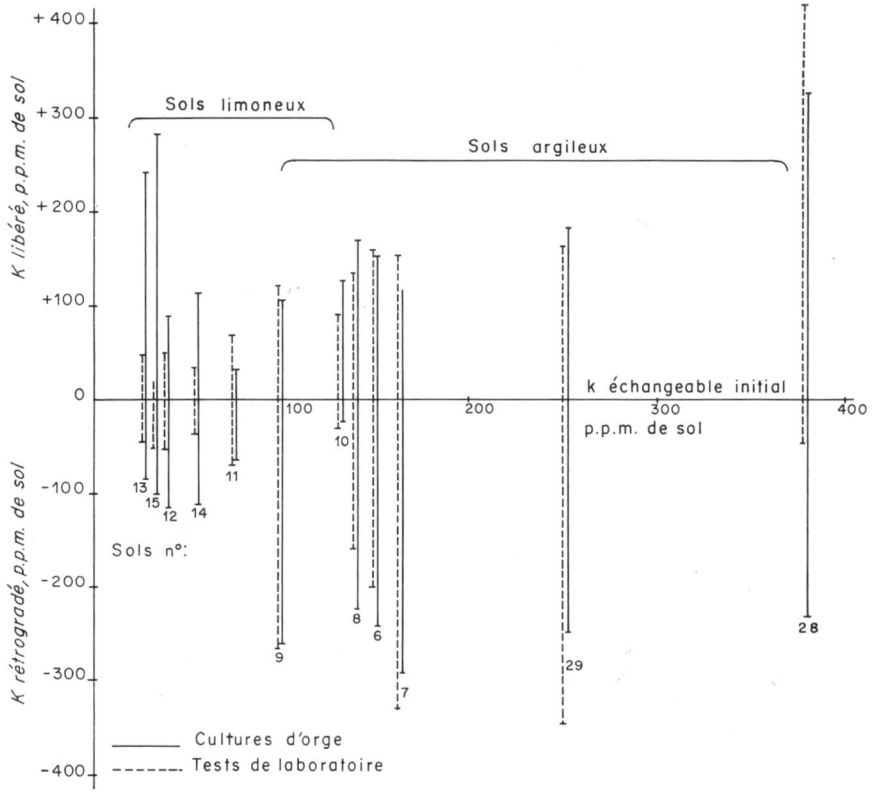


FIG. 1 — *Libérations et rétrogradations de potassium obtenues d'une part sur l'ensemble des deux cultures d'orge, d'autre part au cours des tests de laboratoire (test Van der Marel par voie humide, ou contact TPBNa, 3 jours sans ClNa). Les sols sont classés en fonction de leurs teneurs initiales en potassium échangeable.*

Si le résultat B est positif, il y a eu libération d'ions K^+ ; s'il est négatif, une fixation s'est au contraire produite.

b) On représente ensuite ce bilan B en fonction du résultat du bilan x de potassium total (entrées et sorties du sol) :

$$x = \text{Fumures} - \text{Exportations} = \text{F-E}$$

c) AUDIDIER et *al.* (1962) ont montré, à l'aide d'essais en vases de végétation, que l'on obtient ainsi des droites, du moins au voisinage de l'origine des axes, obéissant donc à une relation de la forme :

$$B = ax + b$$

En utilisant les résultats précédemment publiés par BARBIER et *al.*, (1957), qui se rapportaient à une expérimentation au champ ayant duré quinze ans, nous avons contrôlé que, aux erreurs expérimentales prés, cette relation était bien vérifiée dans les conditions naturelles (figure 2).

Les figures 3 et 4 représentent les résultats obtenus ici, sur les deux principaux types de sols, dans trois conditions différentes ; sur ces figures, chaque point représente l'une de ces conditions :

— épuisement très intense par le ray-grass ;
— épuisement marqué par l'ensemble des deux cultures successives d'orge.
— enrichissement important par deux fumures élevées.

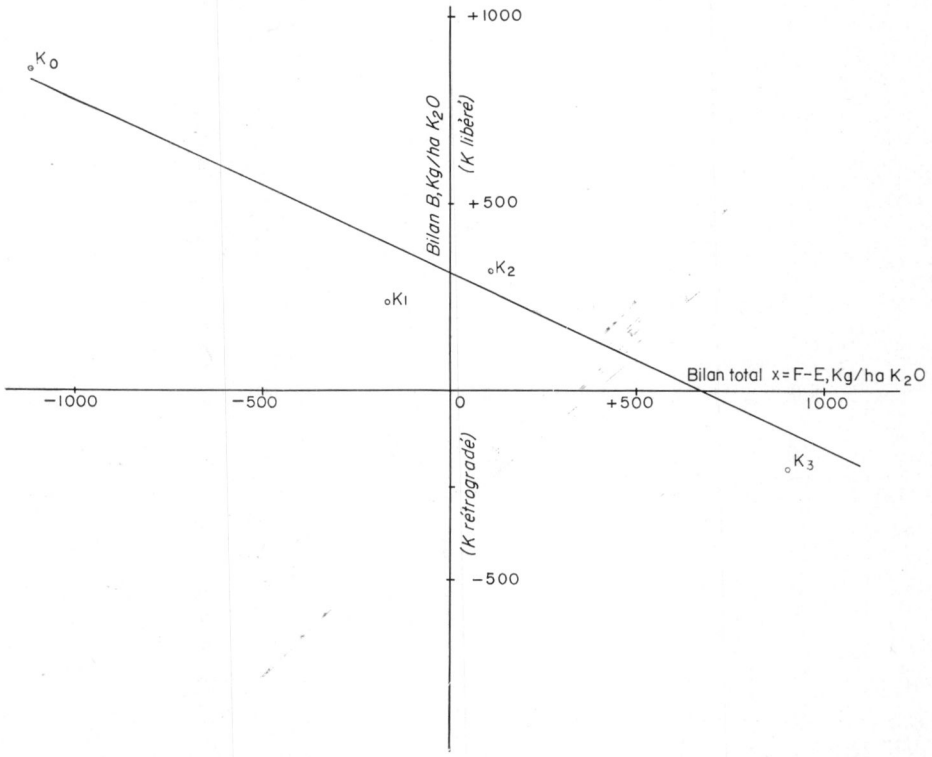


FIG. 2. — *Libérations et rétrogradations de potassium en fonction du bilan de potassium total ; sol de Versailles*

Sur ces deux figures (3 et 4), la droite d'équation B = — *x* a été portée également. Elle représente les conditions de réversibilité parfaite des rétrogradations et libérations d'ions K^+ : à un excédent ou à un déficit quelconque des fumures F par rapport aux exportations E, correspondrait exactement une rétrogradation ou une libération égale à la différence (F — E).

Les échantillons de sols argileux (fig. 3) possèdent un comportement voisin de cette réversibilité complète : le coefficient *a* est peu éloigné de 1 (0,82 à 0,91), et l'ordonnée à l'origine *b* est faible ; sa valeur négative montre que, pour un bilan total *x* nul (F = E), il se produit une légère rétrogradation.

Les représentations relatives aux sols limoneux sont plus complexes (fig. 4). Les résultats obtenus sur l'ensemble des deux cultures d'orge correspondent à des segments de droites de pentes plus faibles, indiquant une tendance beaucoup plus marquée à la libération d'ions K^+ plutôt qu'à la rétrogradation.

Lorsque le bilan total x devient fortement négatif (épuisements par le ray-grass), il apparaît un autre segment de droite, sensiblement parallèle à la bissectrice $B = -x$. Ce résultat n'est pas surprenant : dans ces sols très pauvres en potassium échangeable, une exportation importante par les plantes, en l'absence de fumure, ne peut provenir que d'une libération égale d'ions K^+ initialement non échangeables. L'ordonnée à l'origine b est ici positive : lorsque le bilan est nul ($x = 0$), il se produit une libération de potassium.

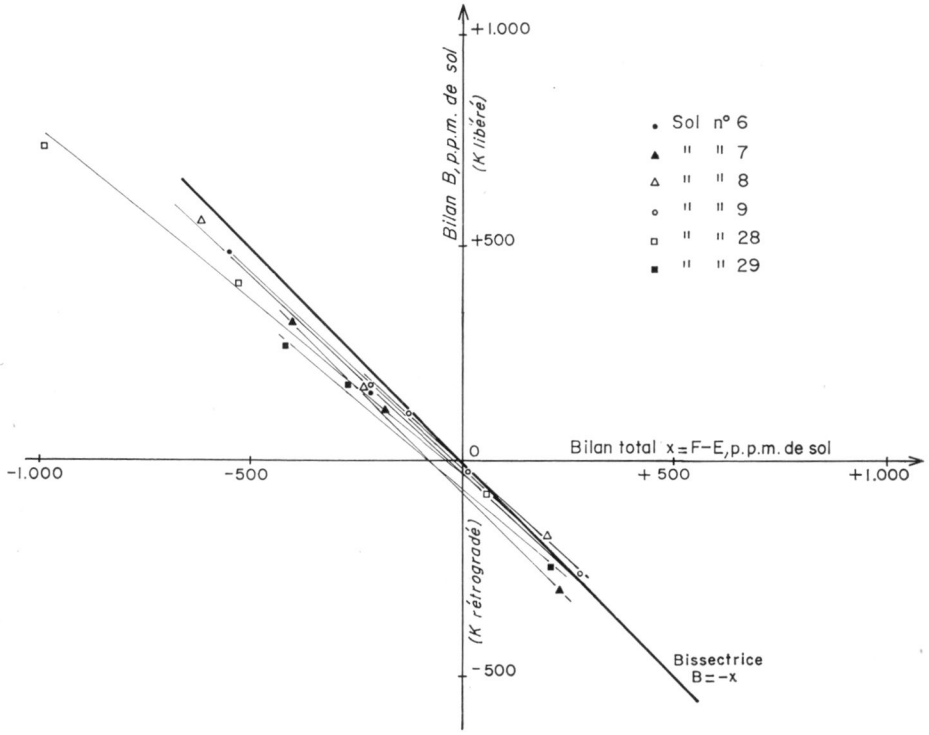


FIG. 3. — *Libérations et rétrogradations de potassium obtenues sur l'ensemble des cultures, en fonction du bilan de potassium total ; sols argileux*

La figure 5 schématise, pour les deux groupes de sols, l'ensemble des observations ; elle s'applique aux terres relativement pauvres en K échangeable que nous avons étudiées ici (quelques aspects de l'influence du niveau des réserves seront examinés ci-dessous). Dans ces conditions :

a) lorsque les exportations sont nettement supérieures aux fumures ($x \ll 0$), le potassium absorbé provient de la libération de quantités sensiblement équivalentes de potassium initialement non échangeable, et B varie linéairement en fonction de x, avec une pente proche de celle de la bissectrice ($a \neq 1$).

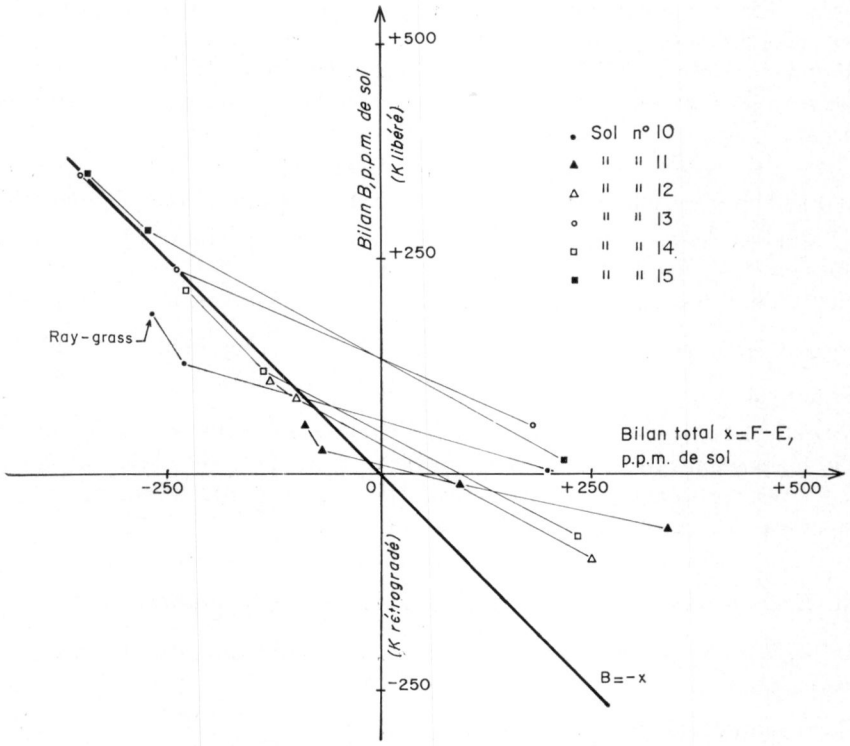


FIG. 4. — *Libérations et rétrogradations de potassium obtenues sur l'ensemble des cultures, en fonction du bilan de potassium total ; sols limoneux*

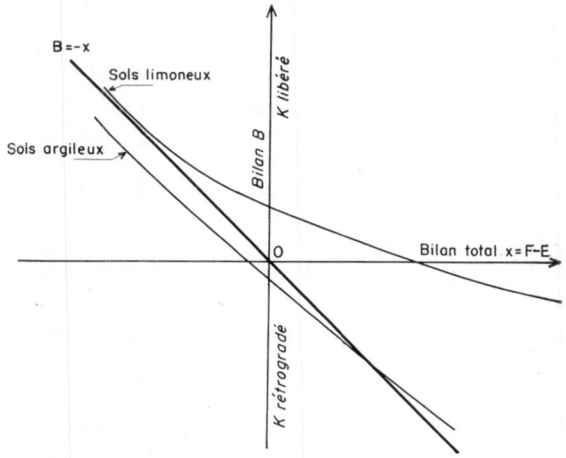


FIG. 5. — *Schéma de l'influence du bilan de potassium total sur les libérations et rétrogradations, dans les deux types de sols étudiés*

b) Cette ligne peut s'incurver lorsque x devient faiblement négatif ou positif, avec une concavité orientée vers les valeurs positives de B, si la tendance à la libération est plus marquée que la tendance opposée à la rétrogradation. Tel est le cas des sols limoneux. Notons qu'une courbure inverse n'est guère concevable : les fixations ne peuvent sensiblement dépasser, dans les conditions naturelles, les reliquats de fumures.

Quand les exportations sont égales aux apports ($x = 0$) le signe et la valeur de B indiquent la prépondérance des fixations ou des libérations, dans le sol considéré.

c) Lorsque les fumures sont très supérieures aux exportations ($x \gg 0$), les sols manifestent des rétrogradations plus ou moins fortes. Celles-ci sont généralement inférieures aux excédents de fumures, car il est rare que l'on n'observe pas d'enrichissement en K échangeable ; le rapport $\frac{\Delta B}{\Delta x}$ est alors inférieur à 1, mais il peut varier dans de très larges proportions (fig. 5).

Signalons enfin que, dans des sols particulièrement riches en potassium échangeable, les phénomènes seraient plus complexes ; en effet, des variations quantitatives des réserves échangeables, sans libérations ni fixations, se traduisent graphiquement par un parallèlisme à l'axe des abscisses.

4. *Examen détaillé du comportement de quelques sols caractéristiques*

a) *Sol argileux de richesse moyenne en potassium échangeable* (*n° 7, 163 p. p. m. K échangeable*).

Les résultats obtenus apparaissent sur la figure 6. Les segments de droites obtenus au cours de la première et de la deuxième culture d'orge, et naturellement sur l'ensemble des deux récoltes, sont parallèles entre eux et possèdent une pente très proche de celle de la bissectrice. L'épuisement réalisé par les coupes successives de ray-grass se traduit par un point bien situé dans le prolongement des lignes relatives à l'orge.

Notons toutefois une particularité : l'ordonnée à l'origine b des droites est positive à la première culture (libération), et négative à la seconde (rétrogradation). Selon l'état d'enrichissement ou d'épuisement dans lequel se trouve un même sol, un bilan nul peut donc se traduire soit par une libération, soit par une rétrogradation de potassium.

b) *Sol argileux plus riche en potassium échangeable* (*n° 28, 379 p. p. m. K échangeable*)

Les représentations, portées sur la figure 7, sont très comparables au cas précédent ; l'ordonnée à l'origine b serait de même positive à la première culture, et devient négative à la seconde. Un épuisement poussé de ce sol conduit à un net appauvrissement en K échangeable ; cela explique que le point « Ray-Grass » soit relativement éloigné de la bissectrice.

c) *Sol limoneux pauvre en potassium échangeable* (*n° 13, 29 p. p. m. K échangeable*)

Les droites obtenues se situent ici nettement au-dessus de la bissectrice, et, de même que sur la figure 4, leur pente est beaucoup plus faible (fig. 8). La première culture a éliminé l'essentiel des réserves facilement mobilisables et, en deuxième cul-

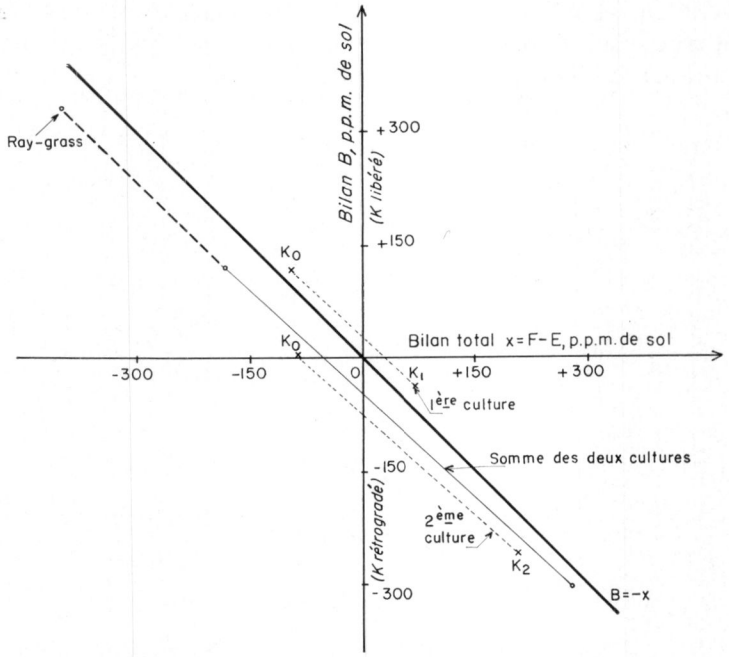


FIG. 6. — *Détail du comportement d'un sol argileux de richesse moyenne en potassium échangeable* (n° 7)

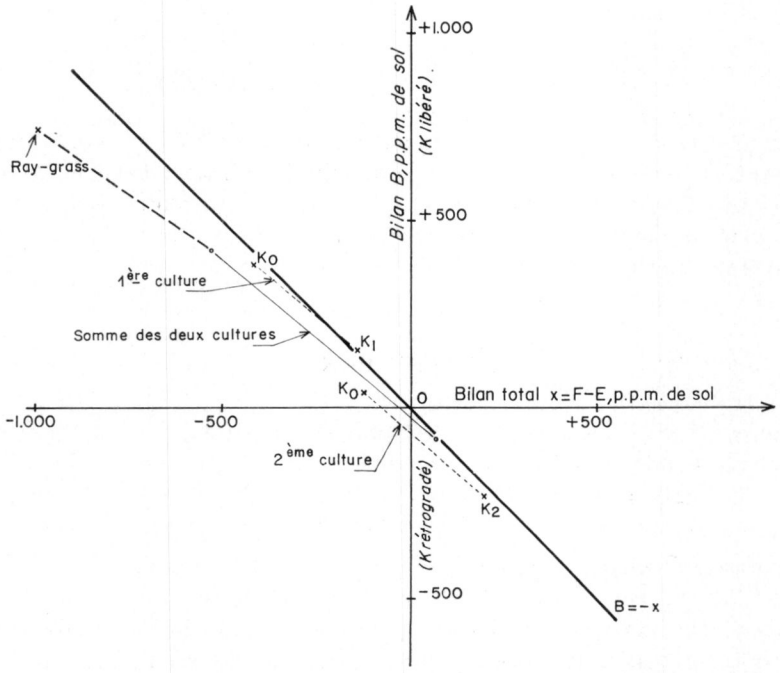


FIG. 7. — *Détail du comportement d'un sol argileux enrichi en potassium échangeable* (n° 28)

ture, la libération est faible ; l'ordonnée à l'origine demeure toutefois légèrement positive, en raison de la faible rétrogradation. L'épuisement par le ray-grass fournit un point situé sur la bissectrice, ce qui était prévisible.

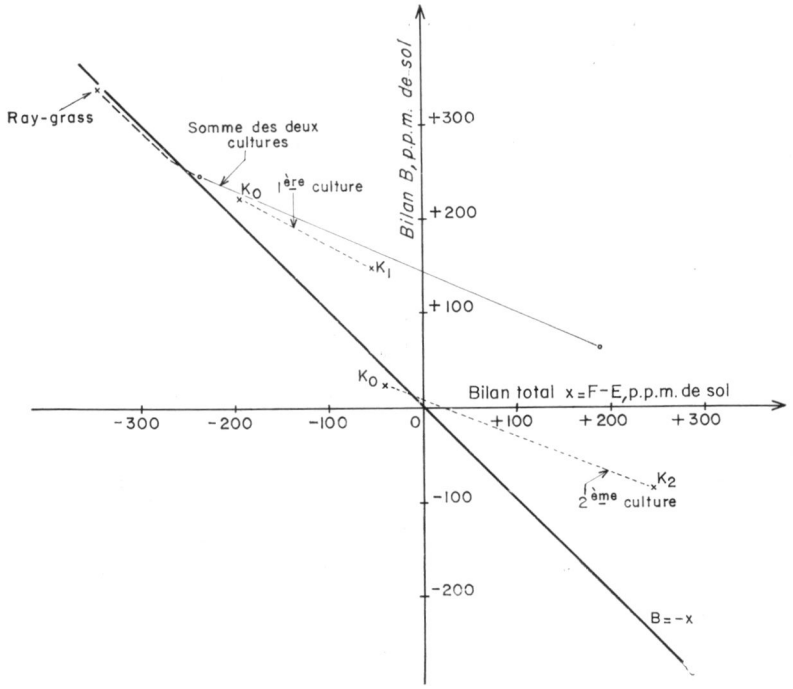


FIG. 8. — *Libérations et rétrogradations d'ions K^+ en fonction du bilan de potassium total, dans un sol limoneux pauvre en potassium échangeable*

d) *Le comportement d'un même type de sol plus enrichi en K échangeable* apparaît directement sur la figure 4 (sol n° 10, 132 p. p. m. K échangeable). La droite représentative possède une plus faible pente et, conformément aux faits discutés ci-dessus, s'éloigne vers la gauche de la bissectrice, pour s'incurver ensuite parallèlement à celle-ci (point « ray-grass »).

DISCUSSION

Cette étude de l'ensemble de la dynamique du potassium dans quelques sols très différents nous paraît soulever les problèmes suivants, d'ordre plus général.

1. *Signification agronomique du potassium échangeable*

Le potassium échangeable, ainsi que nous l'avons déjà souligné (BLANCHET et BOSC, 1966 *a*), ne peut être considéré comme une réserve alimentaire définie. Il représente plutôt une sorte de niveau, de « tube piézométrique », reflétant un état particulier et souvent transitoire des ions K^+, entre les deux tendances inverses que constituent la rétrogradation et la libération.

Ces deux processus sont plus ou moins réversibles selon les sols, et surtout selon leurs aptitudes très diverses à la rétrogradation (fig. 5). Des sols pauvres en potassium échangeable peuvent présenter des possibilités de libération élevées ; les sols limoneux étudiés ici en sont un exemple.

2. *Possibilités de rétrogradation et conduite de la fertilisation*

Lorsque les fumures sont supérieures aux exportations, ou lorsqu'une importante « avance aux cultures » est nécessaire, la pente « a » des droites d'équation $B = ax + b$, ou des tangentes en divers points de relations curvilignes, permet d'apprécier cette aptitude à la rétrogradation. Celle-ci nous paraît importante à considérer dans la pratique des fumures élevées, appliquées à des cultures exigeantes en potassium (prairies temporaires, oléagineux, cultures légumières...). Quelques faits permettent d'illustrer cette opinion.

Considérons en effet le tableau 2. Au cours de la première culture d'orge, il avait été apporté, dans les pots fertilisés, 300 p. p. m. K, et l'exportation a été du même ordre de grandeur ; il n'apparaît donc guère de rétrogradation dans le bilan final.

TABLEAU 4

Productions de matière sèche et teneur en potassium de la deuxième récolte d'orge, en présence de fumure potassique

Type de sol	Matière sèche produite, g/pot.		K p. 100 de matière sèche	
	paille	grain	paille	grain
Sols argileux	43,8	66,7	3,68	0,85
Sols limoneux	31,8	40,7	4,70	1,05
Probabilité pour que les différences de teneurs soient dues au hasard.....			$< 0,01$	$< 0,01$

Les mêmes pots ont reçu à la deuxième culture 600 p. p. m. K, dont 300 à 400 ont été absorbées. L'excédent, soit 200 à 300 p. p. m. , a rétrogradé dans les sols argileux, qui présentent en fin de culture des teneurs en potassium échangeable comparables à celles qui existaient avant tout traitement. Ce fait est conforme à la réversibilité observée ci-dessus. On peut donc penser que les 300 ou 600 p. p. m. apportées avant les cultures avaient subi le même sort, et ont été remises peu à peu, ensuite, à la disposition des plantes.

Dans les mêmes conditions appliquées aux sols limoneux, où la rétrogradation est faible, on assiste, au contraire, après la deuxième culture, à un enrichissement très marqué en potassium échangeable. Le tableau 4 montre que l'orge a effectué d'autre part une très nette consommation de luxe dans ces sols limoneux, par rapport aux sols argileux. Dans ceux-ci, la concurrence exercée par la rétrogradation a nettement atténué la consommation de luxe entraînée par la très forte fumure.

De manière imagée, on pourrait donc qualifier « d'équilibrés » ou de « tamponnés » le groupe des sols argileux, et de « prodigues » ou « non tamponnés » celui des sols limoneux.

La tendance plus ou moins marquée à la rétrogradation, c'est-à-dire le coefficient a de la relation $B = ax + b$, devrait ainsi permettre d'apprécier l'ampleur des réserves échangeables qu'il convient de constituer dans les divers types de sols, selon leurs propriétés, le système de culture et les rendements escomptés.

En grande culture courante, il ne paraît pas nécessaire d'enrichir les sols se rapprochant du type limoneux décrit ici ; les fumures doivent surtout être proportionnées aux besoins annuels des cultures, en les fractionnant éventuellement si ces besoins sont très importants. Par contre, une bonne alimentation des plantes nécessite des réserves échangeables suffisantes dans les sols plus tamponnés, où la rétrogradation des fumures peut concurrencer l'absorption par le végétal.

3. *Critères de caractérisation des sols*

Pour caractériser le « pouvoir alimentaire » d'un sol, la connaissance des réserves échangeables est donc insuffisante, surtout si l'on considère que les phénomènes intervenant au voisinage immédiat des racines sont certainement beaucoup plus accusés que sur l'ensemble du sol, considéré globalement. Le tableau 5, où sont comparées

TABLEAU 5

Comparaison du degré d'exploration par les racines de divers échantillons de sol, et de leurs teneurs finales en potassium échangeable, dans une culture de maïs en vase de végétation

Racines, mg par gramme de terre	K échangeable final, p. p. m. de terre
3,2	30
1,3	48
1,2	43
0,8	53
0,5	55
0,5	78
0,3	78
0,3	83
0,2	95
K échangeable initial	107 p. p. m.

les teneurs en potassium échangeable de portions de sol prélevées, sur un même vase de végétation, dans des portions diversement explorées par les racines, illustre cette opinion (les conditions expérimentales de cet essai ont été décrites précédemment par BLANCHET et CHAUMONT, 1964).

Une vue d'ensemble de la dynamique du potassium dans le type de sol considéré est donc nécessaire. Cette dynamique est essentiellement gouvernée par la nature, le degré d'altération et les proportions des minéraux constituant le sol. Leur étude directe est malheureusement très délicate. Pour les besoins agronomiques, une

approche expérimentale des possibilités de rétrogradation et de libération est, dans l'état actuel de nos connaissances, certainement plus abordable. Ces caractères dépendant davantage de la nature des minéraux que du passé cultural (qui se reflète surtout dans l'ordonnée à l'origine *b* de la relation ci-dessus), leur étude pourrait être envisagée au niveau du terroir plutôt que de la parcelle. La parcelle elle-même serait ensuite caractérisée, dans ce contexte plus général, par sa teneur en potassium échangeable, qui reflèterait l'histoire culturale (BARBIER et *al.*, 1957).

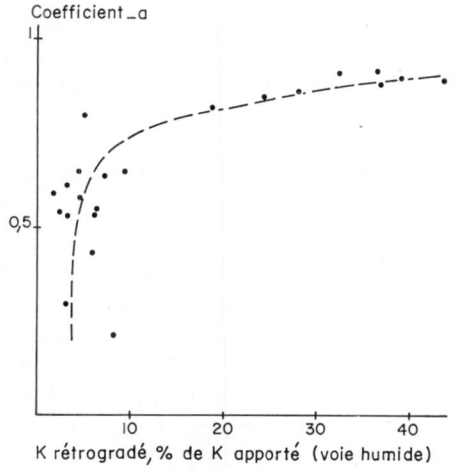


FIG. 9. — *Variations du coefficient* a (*relation* $B = ax + b$) *en fonction de l'indice de fixation de Van der Marel, par voie humide*

Outre les expérimentations au champ ou en vases de végétation, des tests de laboratoire peuvent éclairer notablement le comportement général des sols. Ainsi, la figure 9 montre qu'il existe une relation très nette entre les pentes « *a* » des segments de droites obtenus au cours des cultures, et les fixations déterminées au laboratoire par la technique de VAN DER MAREL (voie humide).

Les possibilités de libération paraissent plus difficiles à apprécier. Le tableau 3 et la figure 1 (sols nº 13 et 15) montrent que l'action des plantes peut être bien différente de celle des réactifs « piègeant » le potassium, tels que le tétraphénylborate de sodium. Il existe certainement des équilibres d'échange plante-sol qui, au niveau des racines, facilitent plus ou moins l'extraction des ions K^+ (BLANCHET et BOSC, 1966 *a*, *b*).

CONCLUSION

La satisfaction de besoins croissants des cultures, au moyen d'une fertilisation de plus en plus intensive, conduit à envisager l'influence des propriétés du sol sur l'alimentation des plantes sous un angle dynamique plutôt que statique. Dans cet esprit, le potassium échangeable ne représente que l'un des éléments d'appréciation de la disponibilité des ions K^+ à l'égard des végétaux. L'ensemble des processus de

rétrogradation et de libération, qui interviennent dans l'ensemble du sol, mais surtout au contact des grains d'engrais et des racines, exercent une grande influence. Aussi l'étude de la réversibilité de ces phénomènes nous paraît un point important.

L'examen des rétrogradations et libérations en fonction du bilan total de potassium (fumures et exportations) fournit à cet égard des indications fort utiles. Des conditions expérimentales aussi différentes que celles qui ont été appliquées ici, dans les cultures d'orge et de ray-grass, conduisent en effet à des résultats homogènes. Ainsi que l'ont déjà montré AUDIDIER et *al.* (1962), l'influence de l'espèce végétale paraît donc beaucoup moins marquée que celle du sol lui-même, du moins en première approximation.

L'application au champ de ce mode d'approche nous semble possible, bien qu'elle soulève diverses difficultés pratiques.

Il ne s'agit naturellement que d'une appréhension très globale et empirique des mécanismes intervenant au cours de l'alimentation des plantes, et les raisons qui déterminent le comportement varié des sols devraient être étudiées de manière approfondie. De nombreux problèmes sont ainsi soulevés : étude minéralogique des argiles, éventualité d'affinités différentes de ces argiles pour les ions K^+, mouvements d'ions pouvant être également différents selon les sols, etc...

D'autre part, le « milieu radiculaire » est certainement très différent de l'ensemble du sol : les discordances observées dans les libérations d'ions K^+ au laboratoire et en présence des plantes en sont une illustration. De nombreux thèmes de recherches sont donc soulevés par les mécanismes complexes que met en jeu l'alimentation potassique des végétaux dans le sol.

Reçu pour publication en septembre 1967.

SUMMARY

POTASSIUM BALANCE AND POTASSIC NUTRITION OF PLANTS WHEN BEING SUBJECTED TO FIXATION AND RELEASE OF NON-EXCHANGEABLE K^+ IONS

The potassium balance, together with the fixation and release of K^+ ions in two chief types of soil (immature clayey/calcareous and leached silty/sandy soils) have been investigated according to the three following methods :

— laboratory tests relating to the contingency of fixation and release of the aforesaid ions ;

— depletive cultivation of frequently-mowed ray-grass ;

— growing successively two barley crops with either no fertilizer or with substantial amounts of potassium, in pot experiments.

The following facts emerge from these tests :

1° Potassic nutrition of plants have little to do with the soil content in exchangeable potassium. The latter is not a definite quantity of stored nutrient, but rather a kind of « level » and condition (which is specific to K^+ ions) that lie between their converse liability to both fixation and release ;

2° In some soils, these two processes are almost fully reversible. Such fixation and release, when graphed in terms of the potassium balance (fertilizers and outgoings), appear as a straight line. When the trend to fixation is less evident, the graph becomes curvilinear. The slope of the straight line, or when it is tangent to the curve, indicates the amount to be stored in various types of soils.

3° These features depend more heavily on the kind of soil minerals than on the content in exchangeable potassium.

4° It should be mentioned that the foregoing laboratory tests provide a better evaluation of the propensity to fixation than to release.

ZUSAMMENFASSUNG

KALIUMBILANZEN UND KALIVERSORGUNG DER PFLANZEN
IN ANWESENHEIT VON RETROGRADIERUNGEN
UND VON NICHTAUSTAUSCHBAREN IONENFREIGABEN K^+

Die Kaliumbilanzen sowie die Retrogradierungen und Freigaben von Ionen K^+ wurden auf verschiedenen, zwei hauptsächlichen Typen angehörenden Böden (leicht verwitterte, kalkhaltige Tonböden und ausgewaschene sandige Lehmböden) nach den folgenden Techniken untersucht :

— Laborstichprobe über Retrogradierungs- und Freigabemöglichkeiten.

— Erschöpfungskulturen mittels häufig geschnittenen Raygrass.

— Zwei nacheinanderfolgende, ohne Düngung oder mit reichlicher Kaliumzufuhr, in Gewächsanlagen angebaute Gerstekulturen.

Es wurden damit die folgenden wesentlichsten Tatsachen festgestellt :

1° Die Kaliversorgung der Pflanzen zeigte sich kaum an den Gehalt der Böden an austauschbarem Kalium gebunden. Dieser Gehalt stellt keinen bestimmten Nahrungsvorrat dar, aber ein barem Kalium gebunden. Dieser Gehalt stellt keinen bestimmten Nahrungsvorrat dar, aber gewisses *Niveau* und einen besonderen Zustand der Ionen K^+ zwischen den beiden entgegengesetzten Tendenzen der Freigabe und der Retrogradierung.

2° In bestimmten Böden weisen diese beiden Tendenzen eine fast vollständige Umkehrmöglichkeit auf. Wird die Darstellung der Freigaben und der Retrogradierungen in Abhängigkeit von der Kaliumbilanz (Düngungen-Ausführen) graphisch vorgefürt, so erhält man eine Gerade. WWen die Tendenz zurRetrogradierung schwächer ist, dann erhält man eine Kurve. Die Neigung der Geraden oder der Tangenten zu den Kurven gibt Auskunft über den Umfang der notwendigen Vorräte in verschiedenen Bodentypen.

3° Diese Eigenschaften sind viel mehr von der Natur der Bodenminerale als vom Gehalt an austaischbaren Kalium.

4° Die hier angewendeten Laborstichproben ermöglichen die Fähigkeit zur Retrogradierung viel zuverlässiger zu beurteilen als die Fähigkeit zur Freigabe.

РЕЗЮМЕ

Баланс калия и калиевое питание растений при закреплении или освобождении необменных ионов K^+.

Р. БЛАНШЭ, М. БОСК.

Авторы изучали баланс калия и закрепление или освобождение ионов K^+ на различных почвах принадлежащих к двум основным типам (глинисто-известковые, незрелые почвы и илисто-песчаные, выщелоченные почвы), при помощи следующих технических приемов :

— Лабораторные тесты возможности закрепления или освобождения.

— Почво-истощающие культуры, с помощью часто скашивамого райграсса.

— Две последовательные культуры ячменя без удобрения, но с крупными подкормками калием, в вегетационных вазах.

Из этих опытов выводятся следующие заключения :

1. Калиевое питание растений не связано с содержанием обменного калия в почве. Этот последний не является определенным питательным запасом, но представляет некоторого рода « уровень » и особое состояние ионов K^+ расположенных между двумя противуположными тенденциями к освобождению или закреплению.

2. В некоторых почвах, обратимость этих двух процессов-совершенна. Графическое воспроизведение освобождений или закреплений, в зависимости от баланса калия (удобрение-вынос), дает в этом случае прямую. При ослаблении тенденции к закреплению, изображение становится криволинейным. Наклонная плоскость прямых, или касательных ко кривым, дает указание полноты запасов необходимых для различных типов почв.

3. Эти характерности больше зависят от природы минералов почвы, чем от содержания в ней обменного калия.

4. Лабораторные тесты проведенные авторами позволяют оценить с большей точностью склонность к закреплению, чем к освобождению.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUDIDIER L., GARAUDEAUX J., CHEVALLIER H., 1962. Balance of exchangeable potassium and total potassium in various soils. *Trans. Meet. Comm. IV and V, internation. Soil Sci. Soc., New-Zealand.*

BARBIER G., TENDILLE C., TROCME S., 1957. Expérience culturale de onze années sur la fumure potassique. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **43**, 256-261.

BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1962. Propriétés physico-chimiques des sols et alimentation potassique des plantes. *Ann. agron.*, **13**, 175-201.

BLANCHET R., CHAUMONT C., 1964. Quelques aspects de la désorption et des mouvements d'ions phosphoriques dans le sol, et de leur participation à l'alimentation des plantes. *Ann. agron.*, **15**, 519-538.

BLANCHET R., GUYOT J., CHAUSSIDON J., CROUZET J., CHAUMONT C., 1965. Influence prédominante des argiles illitiques sur l'alimentation potassique des plantes dans divers types de sols. *Ann. agron.*, **16**, 177-202.

BLANCHET R., BOSC M., 1966. Rôle des équilibres d'échange dans la vitesse d'utilisation par les plantes du potassium initialement non échangeable des sols. *C. R. Acad. Sci.*, **263**, *a* : 513-516 ; *b* : 822-825.

BLANCHET R., MAERTENS C., MARTY J. R., GELFI N., 1966. Influence des constituants minéraux de quelques types de sols sur leurs propriétés physiques et leurs possibilités culturales. *Bull. Ass. fr. Et. Sol*, **9**, 257-274.

BOSC M., FIORAMONTI S., MALTERRE H., 1962. Les sols de la commune de Mauremont, terroir-type du Lauragais. *Bull. Ass. fr. Et. Sol*, **6**, 320-336.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation. *Ann. agron.*, **11**, 121-134.

DUTHION M., 1966. Réserve de potassium lentement libérable d'un sol de limon. *C. R. Acad. Agric. Fr.* **52**, 90-97.

LIWERANT J., 1941. Les sols d'alluvions de la vallée de la Garonne. *Ann. agron.*, 59-82.

MARTY J. R., FIORAMONTI S., 1965. Étude d'un secteur de sols de boulbènes sur alluvions anciennes de la Garonne. *Bull. Ass. fr. Et. Sol*, **6**, 224-264.

MAYEUX J. C., 1961. *Étude chimique des sols de molasses ; dynamique du potassium.* Gomes, Toulouse, 84 pages.

MORTLAND M. M., 1961. The dynamic character of potassium release and fixation. *Soil Sci.*, **91**, 11-13.

RAMAN K. V., JACKSON M. L., 1965. Mica surface morphology changes during weathering. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 29-32.

ROBERT M., PEDRO G., 1966. Transformation d'une phlogopite en vermiculite par extraction du potassium. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **17**, 3-17.

SCHUFFELEN A. C., VAN DER MAREL H. W., 1955. Potassium fixation in soils. In *Potassium Symposium*, Institut International de la Potasse, Berne, 157-201.

SCHULTE E. E., COREY R. B., 1963. Flame photometric determination of potassium precipitated in soils as potassium tetraphenylboron. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 358-360.

VAN DER MAREL H. W., VENEKAMP J. I. N., 1955. Potassium fixation in the dutch soils. *Versl. Landbouwk. Anderzoehn*, **61**, 1-61.

Ann. agron., 1967, **18** (6), 623-638.

DÉTERMINATION DES CONSTANTES DE STABILITÉ DES COMPLEXES ORGANO-MÉTALLIQUES DES SOLS

C. COURPRON

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Ouest, 33 - Pont-de-la-Maye
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

On a déterminé, en utilisant simultanément la méthode de l'équilibre d'échange ionique d'une résine et la méthode des variations continues faisant appel à des mesures spectrophotométriques, les constantes de stabilité des complexes formés entre le cuivre ou le zinc d'une part et les fractions fulviques et humiques extraites de la matière organique d'un sol d'autre part. Ces constantes étant supérieures pour les complexes cuivre-matière organique à celles des complexes zinc-matière organique, on peut s'attendre, dans les sols bien pourvus en humus, à une rétention plus énergique du cuivre que du zinc.

INTRODUCTION

Certains ions métalliques ont la propriété de s'unir avec des molécules ou avec des radicaux pour engendrer des composés de coordination appelés complexes. Parmi ceux-ci, il existe une classe particulièrement importante : ce sont les chélates qui se produisent lorsque le composé qui se combine avec le métal contient un grand nombre de groupes donneurs d'électrons.

La rétention des cations polyvalents par la matière organique du sol est due en partie à la formation de ces complexes, dont certains proviennent uniquement de la formation de sels avec les groupements carboxyliques ou hydroxyles phénoliques et dont d'autres — les chélates — sont caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs cycles insérant l'atome complexé dans une sorte de « pince ». Par ce processus de chélation, beaucoup d'anions organiques (citrate, oxalate, tartrate,...) forment des complexes plus ou moins stables avec des ions métalliques bi ou trivalents tels

que : Ca^{++}, Zn^{++}, Mn^{++}, Cu^{++}, Al^{+++}, Fe^{+++}. La connaissance des constantes de stabilité de ces complexes organo-métalliques peut aider à déterminer ou tout au moins à prévoir le comportement et l'évolution de ces composés dans le sol. Or les informations quantitatives concernant ces valeurs sont réduites et les données que l'on possède sont rares car les méthodes usuelles ne peuvent s'appliquer par suite du manque de connaissances sur la structure chimique de la matière organique : seules, jusqu'à présent, quelques constantes ont pu être déterminées, mais les valeurs obtenues paraissent assez hétérogènes.

C'est ainsi que :

— Coleman, McLung et Moore (1956) ont déterminé la constante de formation du complexe cuivre-tourbe et obtenu $3{,}2 \times 10^6$ soit $\log K = 6{,}5$.

— Himes et Barber (1957) donnent, pour les complexes zinc-matière organique, des valeurs de $\log K$ égales à 3,4 et 5,6 selon le pH.

— Miller et Ohlrogge (1958) trouvent $\log K = 7{,}8$ lorsqu'ils étudient les complexes formés entre le zinc et des extraits aqueux de fumier de ferme.

— Randhawa et Broadbent (1965), lors de leur étude des complexes acides humiques-zinc, indiquent $\log K = 4{,}4$, 6,2, 6,8 selon le pH.

— Récemment, Schnitzer et Skinner (1966) ont publié les valeurs suivantes :

$$\text{Acide fulvique-Cu} \begin{cases} \text{pH} = 3{,}5 — \log K = 5{,}78 \\ \text{pH} = 5{,}0 — \log K = 8{,}69 \end{cases}$$

$$\text{Acide fulvique-Zn} \begin{cases} \text{pH} = 3{,}5 — \log K = 1{,}73 \\ \text{pH} = 5{,}0 — \log K = 2{,}34 \end{cases}$$

Ces chiffres sont en accord avec l'ordre des séries données par Irving et Williams (1948) en ce qui concerne les stabilités relatives des complexes des ions métalliques bivalents.

Le travail que nous avons entrepris a pour but de mettre au point une méthode permettant de déterminer les constantes de stabilité des complexes organo-métalliques susceptibles d'être rencontrés dans les sols. Cette méthode sera appliquée au calcul des constantes des complexes formés entre les métaux Cu ou Zn et les fractions humique et fulvique de la matière organique extraite d'un horizon A_0 d'un podzol de lande humide. D'une façon plus générale, l'utilisation de cette méthode doit pouvoir être élargie à l'étude des complexes formés entre métaux et extraits de sol ou de végétaux comprenant des mélanges d'un grand nombre de substances organiques, dont il peut être utile de déterminer la capacité globale de complexage, ou à la comparaison de différents types de matières organiques au point de vue capacité de séquestration.

MÉTHODES UTILISÉES

Pour étudier la formation des complexes et déterminer leurs constantes de stabilité, il existe un certain nombre de méthodes, d'utilisation plus ou moins facile :

— méthode potentiométrique ou conductométrique (Martell et Calvin, 1952 ; Dubey et Mehrotra, 1966 ; Khanna et Stevenson, 1962).

— Méthode polarographique (De Ford et Hume, 1951; Krivis et *al.*, 1966).

— Méthode de comparaison entre la stabilité de séquestration d'un métal avec un agent complexant de constante connue et la stabilité de séquestration du même métal avec l'agent chélatant de constante inconnue (Himes et Barber, 1957).

— Méthode nécessitant l'utilisation d'une propriété physique additive telle que :

- abaissement cryoscopique (Hagenmuller, 1950),
- indice de réfraction (Spacu et Popper, 1934),
- densité optique (Bailar, 1956 ; Bent et French, 1941 ; Broadbent et Ott, 1957 ; Harvey et Manning, 1950 ; Job, 1928 ; Lanford et Quinan, 1948 ; Mooreet Anderson, 1945 ; Mukherji et Dey, 1958 ; Sangal, 1966 ; Sinha, Nigam et Sangal, 1966 ; Srivastava, Sinha et Dey, 1963 ; Vosburgh et Cooper, 1941 ; Zarembovitch, 1963).

— Méthode mettant en jeu les résines échangeuses d'ions (Lewis et Broadbent, 1961 ; Miller et Ohlrogge, 1958 ; Randhawa et Broadbent, 1965 ; Schnitzer et Skinner, 1966 ; Schubert, 1948).

Pour déterminer les constantes de stabilité, il est nécessaire de connaître non seulement le nombre de molécules de l'agent chélatant qui se combine à un ion métal mais encore les concentrations molaires de la solution métallique et de la solution complexante. Étant donné la complexité de la structure chimique de la matière organique, il n'est pas possible de déterminer les concentrations molaires d'une solution d'acide fulvique ou d'acide humique. Ce sera la juxtaposition de deux méthodes qui permettra de lever cette indétermination.

La technique choisie ici fait donc appel d'une part à des mesures spectrophotométriques et d'autre part au principe d'échange d'ions des résines.

1. *Principe des mesures spectrophotométriques*

La spectrophotométrie a été beaucoup utilisée pour l'étude des complexes formés entre métaux et composés organiques de structure et de formule connues (Fe-EDTA, Hf-thoron, Cu-ammonium, Fe-ferron, Ni-*o*-phénanthroline, Fe-acide citrique,...). Trois méthodes sont basées sur des mesures spectrophotométriques :

méthode des variations continues,
méthode du rapport de pente,
méthode du rapport molaire.

Nous nous intéresserons seulement à la première d'entre elles.

Elle fut décrite par Job (1928) et reprise par Vosburg et Cooper (1941) ; elle permet l'identification des composés formés en solution par réaction d'un ion métallique M et d'une molécule définie R, ainsi que la détermination du nombre de molécules de R qui se combinent à un ion M.

Pour cela, on prépare des mélanges de solution de M et de R de concentration molaire connue, dans des rapports moléculaires différents, mais de telle sorte que le nombre total de moles présentes dans la solution soit constant. Les densités optiques de ces mélanges sont mesurées à une longueur d'onde déterminée (correspondant au maximum d'absorption du complexe formé). La différence Y entre la densité optique

effectivement mesurée et la valeur obtenue en faisant la somme des densités optiques de M et de R est reportée sur un graphique en fonction de la composition des différents mélanges. La courbe résultante présente un maximum ou un minimum suivant que la densité optique a une valeur plus grande ou plus petite pour le complexe que pour les composés M et R séparés. JOB a montré que la composition pour laquelle la différence Y est maximum, correspond à la composition réelle du complexe. Cette méthode a été appelée méthode des variations continues. Elle consiste donc, en résumé, à porter la différence d'absorption entre le mélange et les réactifs pris isolément, en fonction du rapport $\frac{(M)}{(M) + (R)}$, le maximum de cette différence d'absorption indiquant le rapport molaire stœcchiométrique M/R existant dans le complexe. Elle indique donc la composition du complexe.

La constante de stabilité de celui-ci est alors déterminée de la façon suivante :

Pour simplifier le calcul, admettons le cas de la formation d'un complexe 2 : 1, soit :

$$\begin{array}{lccc} & M & + \; 2R & \rightleftharpoons MR_2 \\ \text{au départ, on a :} & a & b & o \\ \text{à l'équilibre, on aura :} & a - x & b - 2x & x \end{array}$$

la constante de formation est :

$$K = \frac{x}{(a - x)\,(b - 2x)^2} \qquad (1)$$

x étant la concentration du complexe à l'équilibre, a et b les concentrations initiales, respectivement de l'ion métallique et de l'agent complexant. En prenant deux concentrations pour lesquelles on observe la même densité optique, c'est-à-dire la même valeur de x, nous avons :

$$K = \frac{x}{(a_1 - x)\,(b_1 - 2x)^2} = \frac{x}{(a_2 - x)\,(b_2 - 2x)^2}$$

La résolution de cette égalité amène une équation du deuxième degré dont les racines sont :

$$x = \frac{-\,[b_2^2 - b_1^2 + 4(a_2 b_2 - a_1 b_1)] \pm \sqrt{A}}{8\,[(a_2 + b_2) - (a_1 + b_1)]}$$

avec :

$$A = b_2^2 - b_1^2 + 4(a_2 b_2 - a_1 b_1)^2 - 16\,\left[[(a_2 + b_2) - (a_1 + b_1)]\,[a_2 b_2^2 - a_1 b_1^2]\right]$$

Cette dernière équation permet de calculer la valeur de x connaissant les concentrations initiales a_1, b_1 et a_2, b_2. En portant cette valeur dans l'équation (1), on détermine la valeur de K.

Si l'on connaissait la composition de la solution organique, l'application de cette méthode spectrophotométrique permettrait de déterminer log K. Mais étant donné le manque d'information concernant la nature de cette solution organique, il faut utiliser simultanément une autre technique faisant appel au principe d'échange ionique d'une résine.

2. *Principe d'échange ionique des résines*

Cette méthode de l'échange ionique d'une résine fut mise au point à l'origine par SCHUBERT (1948), puis appliquée par MILLER et OHLROGGE (1958), RANDHAWA et BROADBENT (1965), SCHNITZER et SKINNER (1966). Elle est basée sur la sélectivité

que possède une résine cationique de retenir les cations métalliques seulement à l'état libre sous forme M^+ ; donc la quantité de métal liée à un poids connu de résine à l'équilibre est proportionnelle à la concentration en ions libres non complexés dans la solution.

Lorsqu'on met en présence en solution un métal M et un agent complexant R, la réaction d'équilibre qui se produit est :

$$M + xR \rightleftarrows MRx$$

dont la constante de formation est :

$$\frac{(MRx)}{(M)\ (R)^x} = K \qquad (11)$$

(M) étant la concentration molaire de l'ion métal,
(R) la concentration de l'agent complexant exprimée en moles/litre,
x le nombre de moles de l'agent complexant qui se combine à un ion métal,
K la constante de formation du complexe.

Remarquons que les véritables constantes thermodynamiques sont établies en tenant compte des activités. Pour pouvoir substituer les concentrations aux activités, nous sommes tenus d'opérer à force ionique constante en ajoutant un électrolyte dans les solutions.

Dans la relation (11), ni x ni (R) ne sont connus (substance organique de structure chimique inconnue). Cependant, si l'on met en présence un poids déterminé de résine cationique avec une quantité constante de métal et des quantités variables et croissantes d'un agent complexant donné, ceci en solution sous certaines conditions de pH et de force ionique, le métal se distribue entre la résine et la solution et l'on peut alors définir une constante de distribution λ telle que :

$$\lambda = \frac{\text{quantité de cations liée à la résine}}{\text{concentration molaire du métal présent dans la solution à l'équilibre}} = \frac{m}{(M) + (MRx)}$$

En l'absence d'agent complexant, le métal se trouve uniquement sous forme ionique et l'on définit alors :

$$\lambda_0 = \frac{m}{(M)}$$

De l'équation (11), on peut écrire :

$$\log K = \log (MRx) - \log (M) - x \log (R)$$

Par ailleurs, à partir des constantes ci-dessus :

$$\log \lambda_0 = \log m - \log (M) \text{ et } \log \lambda = \log m - \log (M) - \log (MRx),$$

d'où la relation génèrale donnée par MARTELL et CALVIN (1952) :

$$\log \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) = \log K + x \log (R).$$

La pente et l'ordonnée à l'origine du graphique $\log \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)$ en fonction de log (R) donnent les valeurs de x et de log K.

Cependant, la difficulté provient de ce que l'on ne connaît pas (R), c'est-à-dire la concentration en moles/litre de la solution de matière organique envisagée. Il serait possible de la déterminer si l'on connaissait le poids d'une molécule d'acide humique ou d'acide fulvique, comme l'ont fait SKINNER et SCHNITZER (1962-1966).

Une méthode donnée par RANDHAWA et BROADBENT (1965) permet de tourner cette difficulté. Ils construisent la courbe donnant $\log\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1\right)$ en fonction de $\log(R)$, (R) étant pris en valeur relative. Ils obtiennent une droite qui est homothétique de la droite réelle, dont la pente x donne le nombre de moles d'acide fulvique ou d'acide humique qui se complexent à un ion métal.

Pour déterminer (R), deux méthodes différentes sont utilisées suivant qu'il s'agit de l'étude du complexe métal-acide humique ou métal-acide fulvique.

a) *Cas de l'acide humique.*

On détermine la capacité maximum de complexage de la solution d'acide humique, c'est-à-dire la quantité de métal qui se complexe à 1 ml de la solution, ceci par dosage du métal après formation de l'humate métallique qui précipite. On connaît d'autre part le nombre de moles d'acide humique qui se combinent à un ion métal (définition même de la valeur x obtenue ci-dessus).

Donc, sachant que :

1 ml de la solution d'acide humique complexe A mg de métal,

et que : x moles d'acide humique se combine à B mg de métal, on détermine par un simple calcul le nombre de moles d'acide humique contenues dans ce ml, donc dans 1 litre, soit la concentration molaire.

b) *Cas de l'acide fulvique.*

On ne peut obtenir la précipitation du « fulvate métallique ». On est donc obligé de faire intervenir une méthode spectrophotométrique. On fait alors appel à la méthode des variations continues de JOB. Cette technique est basée sur le fait que, pour une concentration totale constante de métal et d'agent complexant, la concentration du complexe est la plus grande quand les proportions du métal et de l'agent complexant dans le volume réagissant sont les mêmes que celles qui existent dans le complexe. En fait, comme les solutions de matière organique sont colorées, c'est la différence entre les densités optiques observées et celles qui existeraient si aucun complexe ne se formait qui présente un maximum lorsque les substances en présence sont dans le rapport réel du complexe. Les densités optiques d'une série de solutions acide fulvique-métal sont donc déterminées et comparées à la fonction (une droite) représentant la somme des densités optiques des deux composés pris séparément. Le point de différence maximum peut être facilement déterminé et indique le nombre de ml de solution d'acide fulvique qui se combinent à 1 ml de solution métallique.

Tout comme pour la solution d'acide humique, puisqu'on connaît d'une part le nombre de moles d'acide fulvique qui complexent un ion métal et d'autre part la quantité de métal qui est complexée par 1 ml de solution de matière organique, on peut déterminer le nombre de moles d'acide fulvique que contient 1 ml de la dite solution, d'où la concentration en moles/litre de la solution d'acide fulvique utilisée.

MATÉRIAUX ET MODE OPÉRATOIRE

1. *Origine et extraction des acides fulviques et acides humiques*

Les acides fulviques et humiques sont extraits d'un horizon A_0 d'un podzol caractéristique des sols sableux de lande humide. 20 g de ce sol sont agités en présence de 200 ml de NaOH N/5 pendant 1 heure ; après centrifugation à 4 000 tours/minute pendant 5 minutes et filtration, le filtrat est amené à pH = 1 avec HCl RP.

Après 8 heures de sédimentation, on centrifuge :

— le filtrat fournit la solution d'acide fulvique,

— le culot, séché à 40°, porphyrisé est redissous dans quelques ml de KOH et amené à pH et à volume voulus = solution d'acide humique.

La résine utilisée est une Amberlite IR 120 H saturée en potassium par addition de KOH N, puis lavée et séchée à 40°.

2. *Mode opératoire*

a) *Cas des acides fulviques.*

— Détermination de x.

Dans des fioles de 50 ml, on ajoute successivement :

- des quantités allant de 0 à 25 ml de la solution d'acide fulvique,
- de l'eau bipermutée jusqu'à 35 ml environ,
- 5 ml de KCl N,
- 5 ml de la solution métallique à 500 µg de Cu/ml (dans le cas du Zn, addition d'une solution de ^{65}Zn).

Le contenu de la fiole est amené au pH désiré par KOH ou HCl, chaque fiole est complétée avec de l'eau.

Ces fioles sont ensuite transvasées dans des flacons plastiques contenant 1 g de résine. L'ensemble est agité 1 heure, puis filtré pour retenir la résine. Dans le surnageant, le cuivre est dosé après minéralisation (les filtrats sont amenés à sec dans des capsules en silice sur plaque chauffante, incinérés à 480° pendant 1 heure, repris par 10 ml d'HCl RP, filtrés sur fioles de 50 ml et lavés avec de l'eau bouillante) par la méthode à la bicyclo-hexanone-oxalyldihydrazone (MAZOYER, 1958). Le Zn est dosé directement dans le filtrat par comptage au compteur à scintillations.

Ainsi, soit par dosage colorimétrique (cas du cuivre), soit par dosage radioactif (cas du zinc), on détermine la quantité de métal restant en solution après passage sur résine et atteinte de l'équilibre.

Les constantes de distribution sont calculées d'après l'expression suivante :

$$\lambda_0 = \frac{\alpha_0}{100 - \alpha_0} \frac{V}{p}$$

α_0 = quantité de métal liée à la résine en p. 100 de la quantité initiale
$100 - \alpha_0$ = quantité de métal restant en solution en p. 100 de la quantité initiale
V = volume de la solution (ici 50 ml)
p = poids de résine (ici 1 g)

λ est calculé de la même façon que λ_0 mais en présence de différentes solutions de matière organique.

On détermine x en mesurant la pente de la droite obtenue en traçant $\log\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1\right)$ en fonction de log (R), ayant donné à (R) des valeurs relatives ; ce graphique est tracé sur du papier logarithmique.

— Détermination de la concentration molaire de la solution d'acide fulvique.

On prépare une série de mélanges acide fulvique-Cl_2Cu telle que le volume total soit constant mais que les proportions acide fulvique/Cu varient.

Les densités optiques de chaque mélange ainsi que les densités optiques des solutions de chacun des 2 composés pris isolément sont mesurés à 2 800 Å, domaine d'absorption des fonctions responsables de la chélation, au spectrophotomètre BECKMAN DU.

b) *Cas des acides humiques.*

— Détermination de x.

On utilise le même protocole que dans le cas des solutions d'acides fulviques, avec les transformations suivantes :

- solution d'acide humique à 0,5 mg/ml,
- addition de 3 ml d'une solution de Cl_2Cu à 100 µg de Cu/ml,
- pH ajusté à 5,

et dans le cas du zinc :

- solution d'acide humique à 5 mg/ml,
- addition de 5 ml d'une solution de (Cl_2Zn à 500 µg de Zn/ml + Zn radioactif).

— Détermination de la concentration molaire de la solution d'acide humique.

Pour déterminer la capacité maximum de complexage, on met en présence une quantité définie d'agent complexant et une quantité excédentaire de métal.

Dans une fiole de 50 ml, on ajoute :

- 5 ml de la solution d'acide humique à 5 mg/ml, soit 25 mg d'acide humique,
- 5 ml KCl N,
- 10 ml d'une solution de Cl_2Cu à 1 mg de Cu/ml, soit 10 mg de cuivre.

On amène à pH5. On transvase dans un tube de centrifugeuse, que l'on agite mécaniquement pendant 2 heures. On centrifuge pour éliminer l'humate métallique qui a précipité. On filtre et on dose le métal dans le surnageant par les méthodes déjà mentionnées.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. *Détermination de x (figures 1 et 2)*

Les rapports molaires acide fulvique/Cu et acide humique/Cu à pH 3,5 et 5,0 sont respectivement de 1,35 et 1,66.

Ainsi, à pH 3,5, 4 molécules d'acide fulvique complexent 3 moles de cuivre tandis qu'à pH 5, 5 molécules d'acide humique complexent 3 moles de cuivre (SCHNITZER et SKINNER, 1966).

Par ailleurs, puisque la valeur de x n'est pas un nombre entier, il faut admettre d'une part que l'extrait contient au moins deux types d'agents chélatants, dont l'un forme un complexe 2 : 1 et dont l'autre forme un complexe 1 : 1 (MILLER et OHLROGGE, 1958) et d'autre part que le cuivre est complexé à la fois sous forme monovalente et sous forme bivalente : on calcule d'après les valeurs de x que les sites complexants de l'acide fulvique à pH 3,5 absorbent 35 p. 100 du cuivre sous forme monovalente et 65 p. 100 sous forme divalente puisque x aurait dû être égal à 1 si seulement du cuivre monovalent avait été retenu, et égal à 2 si le cuivre avait été adsorbé uniquement sous forme bivalente (RANDHAWA et BROADBENT, 1965). De même, à pH 5, les sites complexants de l'acide humique absorbent 66 p. 100 du cuivre sous forme monovalente et 34 p. 100 sous forme bivalente.

Quant aux rapports molaires acide fulvique/Zn et acide humique/Zn, ils sont respectivement de 1,17 et 1,0 : c'est dire qu'approximativement, sous nos conditions expérimentales, un ion Zn se combine à une molécule, tant d'acide humique que d'acide fulvique.

Notons qu'il n'a pas été possible d'opérer pour la solution d'acide fulvique à pH $> 3,5$ et pour les acides humiques à pH < 5, car il se produit une précipitation qui rend inutilisables les résultats que l'on pourrait obtenir.

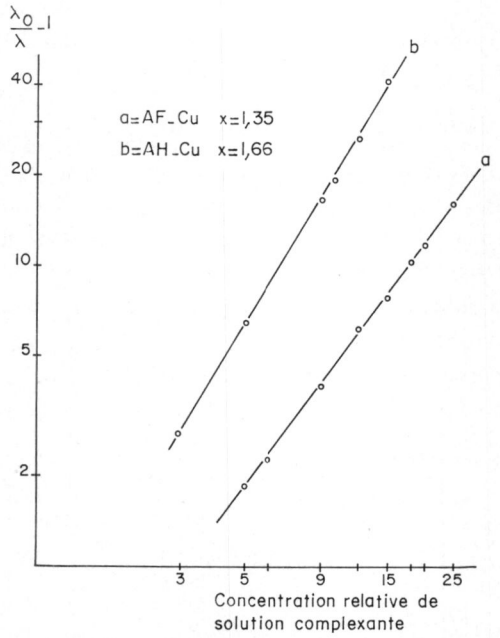


FIG. 1. — *Détermination du nombre de molécules d'acide fulvique* (a) *et d'acide humique* (b) *qui se combinent à un ion cuivre*

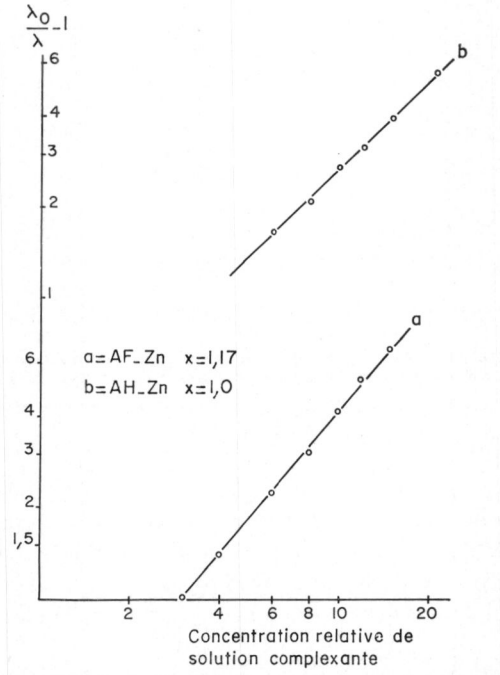


FIG. 2. — *Détermination du nombre de molécules d'acide fulvique* (a) *et d'acide humique* (b) *qui se combinent à un ion zinc*

2. *Détermination de la concentration molaire de la solution d'acide fulvique*

Sur la figure 3 sont portées en fonction du rapport $\frac{\text{acide fulvique}}{(\text{acide fulvique}) + (\text{cuivre})}$ d'une part, les densités optiques des différents mélanges et d'autre part, la somme des densités optiques des deux composés pris isolément. Le point de changement de pente (tabl. 5) correspondant, d'après JOB, à la composition du mélange dans le complexe, se forme pour :

— 10 ml de la solution d'acide fulvique diluée à 1/2 (soit 5 ml de la solution initiale),

— 15 ml de la solution cuivrique à 1 000 µg de Cu/ml.

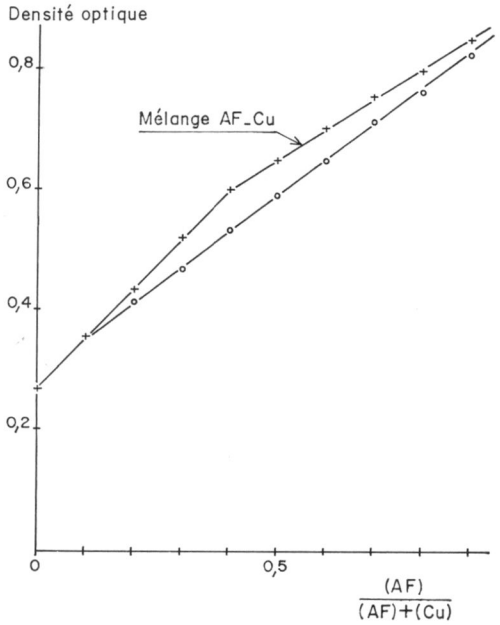


FIG. 3. — *Densités optiques des mélanges acide fulvique-cuivre et des deux composés, mesurées séparément en fonction du rapport :*

$$\frac{(\textit{acide fulvique})}{(\textit{acide fulvique}) + (\textit{cuivre})}$$

Ainsi, 1 ml de la solution d'acide fulvique complexe $47{,}25 \times 10^{-6}$ ions cuivre. Par ailleurs, la détermination de x indique que 1,35 moles d'acide fulvique se combinent à 1 ion cuivre. Le calcul nous fournit le nombre de moles d'acide fulvique contenues dans 1 ml de la solution, d'où la concentration molaire de la solution organique $= 63{,}8 \times 10^{-3}$ M.

On a pu vérifier ces valeurs par utilisation de la méthode spectrophotométrique en partant de solutions équimoléculaires.

3. *Détermination de la concentration molaire de la solution d'acide humique*

On a déterminé la capacité de complexage de la solution d'acide humique en mettant en présence une quantité définie de solution complexante et une quantité excédentaire de solution métallique. L'expérience montre que 25 mg d'acide humique complexent 3,540 mg de cuivre, donc que 1 ml de la solution d'acide humique contenant 0,5 mg/ml complexe $1{,}115 \times 10^{-6}$ moles de cuivre.

Par un raisonnement analogue à celui utilisé précédemment, on détermine la concentration en moles/l de la solution d'acide humique $= 1{,}85 \times 10^{-3}$.

4. *Détermination des constantes de stabilité*

Une fois déterminé le nombre de molécules de l'agent complexant qui se combinent à 1 mole du métal et la concentration molaire des solutions chélatantes, le report de ces valeurs dans l'équation :

$$\log K = \log \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) - x \log (R)$$

permet la détermination des constantes de stabilité.

Les résultats sont fournis dans les tableaux 1, 2, 3 et 4.

TABLEAU 1

Constante de stabilité du complexe Cu-acide fulvique à pH = 3,5 — C = 63,8 × 10^{-3}M/l

Nombre de ml d'acide fulvique	Concentration en M/l × 10^3	µg de Cu dans la solution	α_0	λ_0	λ	$\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1$	x	log K
0	0	107	95,88	1 163,6			1,35	
3	3,83	200	92,31		600,2	0,93		3,24
6	7,66	320	87,88		355,8	2,26		3,21
9	11,47	462	82,24		231,5	4,02		3,22
12	15,30	616	76,31		161,1	6,22		3,24
15	19,15	725	72,12		129,3	7,99		3,22
18	23,00	849	67,35		103,1	10,28		3,23
21	26,80	991	61,89		81,2	13,33		3,25
24	30,60	1 060	59,24		72,7	15,01		3,24
Solution métallique contenant initialement 2 600 µg de Cu/fiole								3,23

Les constantes de stabilité sont de 3,23 et 7,0 pour les complexes acide fulvique/cuivre et acide humique/cuivre et de 2,83 et 2,87 pour les complexes acide fulvique/zinc et acide humique/zinc. Ces valeurs indiquent que la matière organique forme des complexes plus stables avec le cuivre qu'avec le zinc, ce qui implique que le

cuivre risque d'être retenu en quantité plus importante ou plus énergiquement que le zinc dans les sols bien pourvus en humus.

Mentionnons, pour comparaison, les valeurs de log K des complexes formés entre ces métaux (cuivre et zinc) et les agents chélatants du commerce :

	Cu	Zn
acide éthylène diamino-tétraacétique EDTA	18,3	16,3
acide éthylène diamino-diortho-hydroxyl phényl acétique EDDHA	< 15	9,26
acide hydroxy-éthyl éthylène diamino triacétique HEEDTA	17,4	14,5
acide diéthylène triamino pentaacétique, DTPA	21,3	18,1

TABLEAU 2

Constante de stabilité du complexe Cu-acide humique à pH = 5,0 — C = 1,85 × 10⁻³ M/l

Nombre de ml d'acide humique à 0,5 mg/ml	Concentration en M/l × 10^5	µg de Cu dans la solution	α_0	λ_0	λ	$\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1$	x	log K
0	0	13,4	95,66	1 100,0			1,66	
3	11,1	44,8	85,50		295	2,74		7,00
5	18,5	78,0	74,80		148	6,45		7,01
9	33,3	137,0	55,60		63	16,50		6,99
10	37,0	148,5	51,90		54	19,40		6,99
12	44,4	171,5	44,50		40	26,60		6,99
15	55,5	202,0	34,50		26,5	40,70		7,01
Solution métallique contenant initialement 309 µg de Cu/fiole								7,00

TABLEAU 3

Constante de stabilité du complexe Zn-acide fulvique à pH = 3,5 — C = 63,8 × 10⁻³ M/l

Nombre de ml d'acide fulvique	Concentration en M/l × 10^3	Nombre de coups/mn	α_0	λ_0	λ	$\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1$	x	log K
0	0	365	95,59	1 082			1,17	
3	3,83	703	91,49		538	1,02		2,84
6	7,66	1 073	87,00		335	2,24		2,83
9	11,47	1 452	83,40		237	3,58		2,82
12	15,30	1 858	77,50		172	5,30		2,84
15	19,15	2 175	73,65		140	6,75		2,84
Solution métallique d'activité initiale = 8 254 coups/minute								2,83

Ces produits, bien que caractérisés par de fortes valeurs de constantes de stabilité, sont utilisés en agriculture pour combattre les carences. En effet, ils sont utilisés en solution et ne peuvent être efficaces en parvenant aux racines des végétaux, même dans les sols argilo-calcaires à fort pouvoir de fixation, que dans la mesure où le métal est suffisamment lié au radical organique pour échapper à cette fixation. Les problèmes relatifs à l'utilisation et au métabolisme de ces complexes par la plante demeurent non résolus pour la plupart.

TABLEAU 4

Constante de stabilité du complexe Zn-acide humique à pH = 5,0 — C = 1,85 × 10^{-3} M/l

Nombre de ml d'acide humique à 5 mg/ml	Concentration en M/l × 10^4	Nombre de coups/mn	α_0	λ_0	λ	$\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1$	x	log K
0	0	600	94,7	900			1,0	
6	22,5	1 483	87,0		335	1,68		2,88
8	29,6	1 727	84,8		279	2,12		2,86
10	37,0	1 994	82,5		236	2,81		2,88
12	44,4	2 176	80,9		212	3,25		2,87
15	55,5	2 518	78,0		177	4,08		2,87
18	66,6	2 823	75,3		152	4,92		2,87
21	77,7	3 148	72,4		131	5,87		2,87
Solution métallique d'activité initiale = 11 400 coups/minute								2,87

TABLEAU 5

Densités optiques des mélanges Cu-acide fulvique et densités optiques des composés, mesurées séparément à 2 800 Å

$\frac{(AF)}{(AF) + (Cu)}$	Densité optique mesurée du mélange	Densité optique de la solution complexante	Densité optique de la solution métallique	Somme des densités optiques des solutions complexante et métallique
0	0,270	0	0,270	0,270
0,1	0,355	0,113	0,237	0,350
0,2	0,435	0,195	0,219	0,414
0,3	0,520	0,280	0,187	0,567
0,4	0,598	0,367	0,168	0,535
0,5	0,650	0,450	0,140	0,590
0,6	0,705	0,538	0,112	0,650
0,7	0,755	0,622	0,096	0,718
0,8	0,800	0,700	0,065	0,765
0,9	0,845	0,780	0,045	0,825
1,0	0,860	0,860	0	0,860

CONCLUSION

Cet ensemble de techniques permet la détermination des constantes de stabilité des complexes formés entre des métaux et des solutions de composition et de formule inconnues. Elle est donc applicable à l'étude des complexes métal-extraits de sol ou de végétaux, contenant des mélanges de substances organiques de structure chimique indéterminée.

Son utilisation paraît pouvoir être élargie à l'évaluation de la stabilité des liaisons entre une solution métallique et une solution d'origine biologique dont on sait qu'elle est complexante, mais dont il peut paraître utile de chiffrer le pouvoir complexant par rapport à différents métaux.

Reçu pour publication en octobre 1967.

SUMMARY

DETERMINATION OF THE CONSTANTS OF STABILITY OF ORGANO-METALLIC COMPLEXES OF SOILS

The matter dealt with herein is the molar compositions and the constants of stability of the organo-metallic-complexes brought about between the fulvic and humic fractions of the organic matter removed from the horizon A_0 of a podzol of moist moorland, and the metals Cu and Zn.

These determinations are based, 1) on the method of the ion equilibrium of a cationic resin and, 2) on the spectrophotometric method of JOB's continuous variations.

The resulting data are as follows :

— fulvic acid/Cu : log K = 3.23
— fulvic acid/Zn : log K = 2.83
— humic acid/Cu : log K = 7.00
— humic acid/Zn : log K = 2.87

These data show that the organic matter forms more stable complexes with copper than with zinc, this implying in humus rich soils a greater retention of copper than zinc.

The foregoing is apparently applicable to evaluating the stability between a metallic solution and a complexing solution of indefinite composition and nature (extracts from plants, any type of biological matter).

ZUSAMMENFASSUNG

BESTIMMUNG DER STABILITÄTSKONSTANTEN METALLORGANISCHER KOMPLEXE DER BÖDEN

Die molekularen Zusammensetzungen und die Stabilitätskonstanten der metallorganischen Komplexe, die zwischen den rotbräunlichen und humushaltigen Anteilen des, aus dem A_0-Horizont eines Podzols feuchter Heide extrahierten organischen Materials, und den Metallen Cu und Zn bestehen, wurden bestimmt.

Diese Untersuchungen beruhen einerseits auf der Methode des ionischen Gleichgewichtes eines

kationischen Harzes, und anderseits auf der spectrophotometrischen Methode der kontinuierlichen Variationen von Job.

Man erhielt die folgenden Werte :

Humussäure-Cu.....	log K = 3,23
Humussäure-Zn.....	log K = 2,83
Huminsäure-Cu.....	log K = 7,00
Huminsäure-Zn.....	log K = 2,87

Diese Ergebnisse zeigen, dass das organische Material stabilere Komplex mit dem Kupfer als mit dem Zink bildet, woraus auf eine ausgeprägtere Zurückhaltung des Kupfers als des Zinkus in mit Humus angereicherten Bôden zu schliessen ist.

Es scheint, dass diese gesamten Verfahren zur Beurteilung der Bindungsstabilität zwischen einer metallischen Lösung und einer komplexbildenden Lösung von unbestimmter Natur und Zusammensetzung anwendbar sind (Pflanzliche Extrakte-Stoffe beliebiger biologischer Herkunft).

РЕЗЮМЕ

Определение постоянных прочности органо-металлических комплексов почв.

К. КУРПРОН

Автор определил молярный состав и постоянные прочности органометаллических комплексов, образовавшихся между фульвокислотной и гуминовой фракциями органического вещества горизонта A_0 подзола влажной пустоши, и медью или цинком. Определения эти были проведены с помощью методики равновесия ионов катионита и спектрофотометрическим методом постоянных изменений Жоба.

Найдены были следующие величины :

— Фульвокислота — медь : log K = 3,23
— Фульвокислота — цинк : log K = 2,83
— Гуминовая кислота — медь : log K = 7,00
— Гуминовая кислота — цинк : log K = 2,87

Результаты эти показывают, что органическое вещество почв образует с медью комплексы более прочные чем с цинком, что означает более энергичную фиксацию меди, по сравнению с цинком, в почвах хорошо снабженных гумусом.

Автор полагает, что указанные технические приемы, могут быть применены для оценки прочности связей между металлическим раствором и растворами неопределенных по природе и составу комплексов (вытяжки из растений — вещества какого-либо биологического происхождения).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bailar J. C., 1956. *The chemistry of the coordination compounds.* **18**, 563-624.

Bent H. E., French C. L., 1941. *J. amer. chem. Soc.*, **63**, 568-. Cité par Harvey et Manning.

Broadbent F. E., Ott J. B., 1957. Soil organic matter-metal complexes. Factors affecting retention of various cations. *Soil Sci.*, **83**, 419-427.

Coleman N. T., McClung A. C., Moore D. P., 1956. Formation constants for copper-peat complexes. *Science*, **123**, 330-331.

De Ford D. D., Hume D. N., 1951. *J. amer. chem. Soc.*, **73**. 5321. Cité par Bailar.

DUBEY S. N., MEHROTRA R. C., 1966. A study of catechol and pyrogallol derivatives of copper. *J. indian chem. Soc.*, **43**, 73-80.

GOULD R. K., VOSBURGH W. C., 1942. *J. amer. chem. Soc.*, **64**, 1630. Cité par BAILAR.

HAGENMULLER P., 1950. Nouvelle méthode de détermination de la constante de stabilité d'un complexe en solution. *C. R. Acad. Sci.*, **230**, 2190-91.

HARVEY A. E., MANNING D. L., 1950. Spectrophotometric methods of establishing empirical formulas of colored complexes in solution. *J. amer. chem. Soc.*, **72**, 4488-4493.

HIMES F. L., BARBER S. A., 1957. Chelating ability of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 368-373.

IRVING H., WILLIAMS R., 1948 Order of stability of metal complexes. *Nature*, **162**, 746-747.

JOB P., 1928. *Ann. Chim.*, **9**, 113. Cité par BAILAR.

KHANNA S. S., STEVENSON F. J., 1962. Metallo-organic complexes in soil : potentiometric titration of some soil organic matter isolates in the presence of transition metals. *Soil Sci.*, **93**, 298-305.

KRIVIS A. F., SUPP G. R., DOERR R. L., 1966. Stability constants of some complexes of cadmium. *Anal. Chem.*, **38**, 936-938.

LANFORD O. E., QUINAN J. R., 1948. A spectrophotometric study of the reaction of ferric iron and citric acid. *J. amer. chem. Soc.*, **70**, 2900-2903.

LEWIS T. E., BROADBENT F. E., 1961. Soil organic matter-metal complexes. *Soil Sci.*, **91**, 341-348 et 393-399.

MARTELL E. A., CALVIN M., 1952. *Chemistry of metal chelate compounds.* Prentice-Hall Inc., New York.

MAZOYER R., 1958. Sur une nouvelle méthode colorimétrique du dosage du cuivre dans les plantes. *Ann. agron.*, **3**, 299-300.

MILLER M. H., OHLROGGE A. J., 1958. Water-soluble chelating agents in organic materials. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**. 225-, 228, 228-231.

MOORE R. L., ANDERSON R. C., 1945. *J. amer. chem. Soc.*, **67**, 167. Cité par BAILAR.

MUKHERJI A. K., DEY A. K., 1958. Chelate formation of ammonium aurintricarboxylate with bivalent copper : physico-chemical investigation of the composition, structure and stability. *Anal. Chim. Acta*, **18**, 324-329.

RANDHAWA N. S., BROADBENT F. E., 1965. Soil organic matter-metal complexes : stability constants of zinc-humic acid complexes at different pH values. *Soil Sci.*, **99**, 362-366.

SANGAL S. P., 1966. Le chélate 1 : 2 hafnium-thoron. *Chim. Anal.*, **48**, 566-570.

SCHNITZER M., SKINNER S. I. M., 1966. Organo-metallic interaction in soils. Stability constants of Cu^{++}-, $Fe^{++}V$, and Zn^{++}-fulvic acid complexes. *Soil Sci.*, **102**, 361-365.

SCHNITZER M., DESJARDINS J. G., 1962. Molecular and equivalent weights of the organic matter of a podzol. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**, 362-365.

SCHUBERT J., 1948. Use of ion exchanges for the determination of physical chemical properties of substances, particularly radiotracers. *J. Phys. Coll. Chem.*, **52**, 340-350.

SINHA S, N., NIGAM H. L., SANGAL S. P., 1966. Étude de la formation de complexes entre le rhodium et l'acide mercapto-succinique. *Chim. Anal.*, **48**, 515.

SPACU, POPPER, 1934. *Bull. Soc. Stünte Cluj.*, **7**, 400, cité par VOSBURGH et COOPER.

SRIVASTAVA S. C., SINHA S. N., DEY A. K., 1963. Formation de chélate entre le fer trivalent et l'acide hydroxy-8-iodo-7-quinoléine sulfonique 5 (ferron). *Chim. Anal.*, **45**, 124-132.

VOSBURGH W. C., COOPER G. R., 1941. Complex ions : the identification of complex ions in solutions by spectrophotométric measurements. *J. amer. chem., Soc.*, **63**, 437-442.

ZAREMBOWITCH J., 1963. Détermination par spectrophotométrie de la constante de formation du complexe cuivrique de l'histamine de la forme 1 : 1. *C. R. Acad. Sci.*, **256**, 1290.

Ann. agron., 1967, **18** (6), 639-651.

SIGNIFICATION PHYSIOLOGIQUE DE LA PRESSION DE SUCCION DES FEUILLES EN RELATION AVEC L'ÉCOLOGIE DE LA PLANTE

Suzanne MÉRIAUX

avec la collaboration technique de C. PERREY et Anne-Marie VERNIQUET

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, 21 - Dijon
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Des mesures de pression de succion ont été réalisées sur des dactyles en chambre de végétation. Les résultats sont dans l'ensemble assez proches de ce que laissait prévoir la relation théorique entre la pression de succion, l'évapotranspiration potentielle et l'humidité du sol. Ils précisent la liaison entre la pression de succion critique et la régulation stomatique.

INTRODUCTION

La pression de succion des tissus végétaux (ou déficit de pression de diffusion : DPD) présente une grande importance en physiologie car elle règle les déplacements de l'eau à l'intérieur des organes ainsi que ses échanges avec l'extérieur. La pression de succion (P_s) est la différence entre la pression osmotique (P_o) du suc cellulaire qui tend à faire pénétrer l'eau dans la cellule et la pression de la membrane (P_m) qui tend à l'en faire sortir.

Dans une cellule plasmolysée, $P_s = P_o$, car $P_m = 0$, tandis que dans une cellule turgescente P_m tend vers P_o, d'où P_s tend vers zéro.

Différents auteurs parmi lesquels G. LEMÉE (1951-1956), BONNER et GALSTON (1958), S. de PARCEVAUX (1961) ont cherché à utiliser cette donnée pour contrôler l'alimentation en eau des plantes. Sur un Dactyle cultivé en plein champ, nous avons (1961-1964) tenté de relier les variations de la pression de succion des feuilles aux

conditions climatiques ambiantes et à l'humidité du sol. L'influence primordiale des facteurs météorologiques masquait alors l'action propre du déficit en eau du sol, cette dernière n'apparaissant que dans le cas d'évapotranspiration intense. En outre, la pression de succion mesurée au champ à un instant donné étant la résultante des données climatiques préalables, elles-mêmes variables dans le temps, il était impossible de préciser la signification exacte de cette donnée dans la manifestation du besoin en eau de la plante. Nous avons donc cherché à établir des conditions climatiques et hydriques constantes à différents niveaux pour contrôler les facteurs en jeu.

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES ET MATÉRIEL UTILISÉ

1. *Cultures en vases de végétation*

L'essai a été réalisé en *vases de végétation* de type Burgevin contenant 10,700 kg de terre sèche. Cette *terre*, à 45 p. 100 d'argile, possède du point de vue hydrique les caractéristiques suivantes :

Capacité de rétention à pF 2,8 : 30 p. 100.
Humidité au point de flétrissement à pF 4,2 : 15 p. 100.

Un apport de P, S, Mg et K a été réalisé initialement par mélange à la terre de chaque pot de 10 g de superphosphate, 2 g de $MgCl_2$ et 8 g de $KHCO_3$. N était apporté en cours de végétation sous forme d'une solution de $Ca(NO_3)_2$.

Le *Dactyle Floréal* a été repiqué à raison de six pieds par vase. Il a été maintenu en végétation pendant 15 mois à partir de cette date. Les différentes coupes ont été effectuées les 28 juillet et 5 novembre 1964, les 5 janvier, 18 mars et 1er juillet 1965, déterminant cinq cycles végétatifs.

L'éclairage artificiel était assuré par des tubes fluorescents Mazda à flux dirigé (TFD 120 W, DF/BS, blanc super) répartis sur une surface de 1,50 m × 0,72 m, à 1 m du sommet des vases de végétation. Le dispositif était installé dans une pièce recevant un éclairage naturel assez restreint.

La photopériode était de 14 heures. Un ventilateur situé à une extrémité du dispositif dans le plan des tubes, à 55 cm du niveau de la végétation, uniformisait la température et assurait l'évaporation. Cette dernière était contrôlée par 7 évaporomètres Piche, répartis dans la zone éclairée.

L'éclairement sous le dispositif a varié, selon le traitement, de 3 180 à 9 540 lux en moyenne. A 2 mètres de ce dispositif, il n'était plus que de 200 lux en moyenne au milieu du jour.

2. *Traitement étudié*

Il a consisté à suivre la répercussion du dessèchement du sol, dans des conditions évaporantes variables, sur l'état hydrique de la plante et son comportement.

21. *Variations hydriques.*

Les pots du traitement *témoin irrigué* étaient réhumectés chaque jour à la capacité de rétention. Ceux du traitement *dessèchement* étaient pesés chaque jour et réhumectés seulement à proximité du point de flétrissement. L'expérience comportait 6 répétitions.

22. *Variations climatiques.*

Nous avons soumis les vases de végétation à des éclairements croissants, à partir de tubes non isolés de la chambre, provoquant ainsi une variation de la température, de l'hygrométrie et de l'évapotranspiration potentielle.

L'éclairage a varié de 3 à 12 tubes, dans l'ordre suivant : 12, 6, 9, 3, 6, 12. Constant sur les 2/3 centraux de la surface éclairée, l'éclairement était plus faible à chacune des extrémités ; les variations étaient les suivantes :

Nombre de tubes	3	6	9	12
Éclairement (en lux)				
— des 2/3 centraux de la surface	3790	5880	7880	11380
— de la surface totale	3180	5160	6670	9540

Les cycles 1, 2 et 3 ont été éclairés à 2 500 lux. L'expérience de 3 à 12 tubes a concerné les cycles 4 et 5.

3. *Techniques analytiques*

31. *Pression de succion des feuilles* (Ps ou DPD).

La pression de succion des feuilles a été déterminée par la méthode densimétrique de CHARDAKOV.

Elle consiste à rechercher la solution de saccharose de concentration telle qu'il n'y ait pas d'échange d'eau avec les tissus qu'on y a immergés. Les échanges d'eau sont détectés par la modification de densité qu'ils occasionnent dans la solution.

Les feuilles de dactyle sont coupées en tronçons de 1 à 3 cm, rincées une ou deux fois par la solution sucrée et laissées en contact une nuit après quelques agitations manuelles dans des tubes à essai contenant une solution sucrée de concentration croissant de 0,1 à 1 mol. g/litre.

La coloration de la solution après échange avec le suc cellulaire est assurée par le rouge Congo. Une goutte de liquide coloré est introduite dans chaque tube de la solution initiale de saccharose. La pression de succion est égale à la pression osmotique de la solution du tube dans lequel la goutte reste en équilibre, sans monter ni descendre. Les résultats sont exprimés en atmosphères.

La précision de la méthode a été testée en particulier sur les dactyles des pots en dessèchement à 21,3 p. 100 d'humidité. Avec 18 répétitions, cette précision est de 16,8 p. 100. Pour avoir une précision de 10 p. 100, il est nécessaire que le nombre de répétitions soit voisin de 50. Avec 25 répétitions, le chiffre des unités est significatif, tandis qu'avec 6 répétitions, le résultat est donné à 28 p. 100 près, c'est-à-dire à 2 atmosphères. Toutefois, dans d'autres essais de détermination de la précision, celle-ci s'est abaissée à $\pm$ 0,5 atmosphère.

32. *Transpiration.*

Elle a été obtenue par la pesée quotidienne des pots. Il s'agit en réalité d'évapotranspiration car la surface des pots n'était pas isolée de l'atmosphère.

33. *Évapotranspiration potentielle.*

Elle a été mesurée par l'évaporomètre Piche sans correction (moyenne de sept appareils).

RÉSULTATS

1. *Étude de la technique de détermination de P_s*

Une étude préalable a été entreprise sur des dactyles de plein champ, afin d'étudier l'influence sur la valeur de la pression de succion de certains paramètres liés au végétal ou à la technique elle-même.

11. *Position de la feuille.*

Sur des lambeaux de 3 cm, rincés 1 fois, les résultats ont été les suivants : (P_s en atmosphères).

									Moyenne
1ere	feuille	à	partir	du	sommet :	12,2	10,1	10,6 11,1	11,8	11,1
2e	—	—	—			10,5	11,1	11,6 7,2	11,1	10,3
3e	—	—	—			11,4	8,1	14,9 12,2	> 14,3	> 12,2
4e	—	—	—			8,6	< 7,6	< 10,1 13,2	> 14,3	$\simeq$ 10,7

Il découle de ces données une influence possible, bien que mal définie, de la position de la feuille sur la valeur de P_s.

Nous avons adopté arbitrairement la 2e feuille à partir du sommet.

12. *Facteurs techniques.*

12. 1. *Température ambiante.*

Les mesures ont été faites à 15°C, 20°C, 25°C sur des feuilles de même rang. Sur les 5 comparaisons faites, les résultats sont les suivants :

P_s 25°C ≠ P_s 20°C	4 fois sur 5
P_s 25°C ≠ P_s 15°C	5 fois sur 5
P_s 20°C ≠ P_s 15°C	4 fois sur 5

Nous avons donc adopté la température de 20°C.

12. 2. *Longueur des lambeaux et nombre de rinçages.*

Sur des feuilles en position 2, des lambeaux de 1 et 3 cm ont été rincés 1 ou 2 fois par la solution de saccharose afin d'éliminer le suc des cellules lésées par la section.

— *Influence de la longueur du lambeau.*

	1 cm	*3 cm*
	14,5	10,5
	14,3	13,2
	15,3	16,0
	13,8	12,2
Moyenne	14,5	13,0

— *Influence du nombre de rinçages.*

	1 rinçage	2 rinçages
	11,1	12,25
	14,5	14,4
	14,3	13,8
Moyenne	13,3	13,5

Nous n'observons aucune influence sensible de la longueur du lambeau et du nombre de rinçages. Nous avons donc adopté la longueur de 3 cm avec un rinçage.

2. *Relation entre l'éclairement et les facteurs climatiques*

Dans les conditions de l'expérience et selon le nombre de tubes employés l'éclairement varie ainsi que la température et l'humidité relative.

TABLEAU 1

Nombre de tubes	3	6	9	12
Éclairement moyen (en lux)	3180	5160	6670	9540
Température (en °C)	19,2	22,2	24,8	27,0
Humidité relative (en %)	64	67	70	40
ETP jour (en mm)	1,7	1,8	2,0	3,3

L'examen de ces chiffres montre que, outre son effet sur l'éclairement, le nombre de tubes a une action sur la température et, surtout pour 12 tubes, sur l'humidité relative et l'évapotranspiration potentielle. Ce dernier facteur climatique étant la résultante des deux précédents, nous pourrons donc considérer que, dans cette expérience, nous avons fait varier l'évapotranspiration potentielle.

3. *Variation de la transpiration en fonction de l'éclairement*

La figure 1 représente les courbes de desséchement Δ_H/Δ_t en fonction de l'humidité pour les quatre éclairages. Ces courbes se scindent en deux parties : un palier qui indique un desséchement constant, donc un débit d'eau dans la plante suffisant

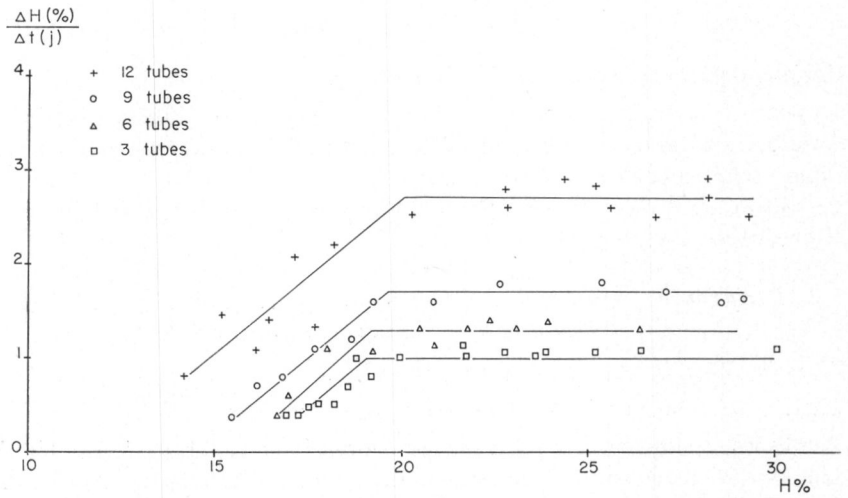


FIG. 1. — *Relation entre le dessèchement et l'humidité du sol à quatre niveaux d'éclairement*

pour assurer la transpiration potentielle et une droite en pente qui traduit la diminution du dessèchement par unité de temps quand l'humidité décroît. Les différentes caractéristiques de ces courbes sont les suivantes :

TABLEAU 2

Éclairement	Pente de la droite	Limite inférieure du dessèchement	Limite supérieure du dessèchement	H_2O critique du sol (début du palier)	
				%	pF
3 180	0,32	0,4	1,0	19,0	3,6
5 160	0,32	0,4	1,3	19,0	3,6
6 670	0,32	0,4	1,7	19,5	3,55
9 540	0,32	0,8	2,7	20,0	3,5

31. *Variation en conditions d'humidité satisfaisante.*

Le palier que l'on observe dans ces conditions correspond à un dessèchement d'autant plus élevé que l'éclairement est plus important (fig. 1 ; tabl. 2). Notons que les transpirations maximales traduites par ces paliers varient plus avec les éclairements que les valeurs de l'évapotranspiration potentielle, ainsi que le montrent

les indices suivants (rapport de la transpiration maximale ou de l'ETP pour un éclairement donné à l'éclairement minimum) :

	TM	ETP
3 tubes	1,0	1,0
6 tubes	1,3	1,06
9 tubes	1,7	1,18
12 tubes	2,7	1,94

32. *Variation en conditions d'humidité insuffisante.*

La pente de la droite est constante et égale à 0,32 pour les différents éclairements. Le raccordement des deux droites se fait à un taux d'humidité du sol d'autant plus élevé que l'éclairement est plus important.

La vitesse de dessèchement atteinte au voisinage du point de flétrissement est plus élevée avec l'éclairement maximum.

4. *Variation de la pression de succion des feuilles dans des conditions d'alimentation en eau optimales*

41. *Variation avec les facteurs liés à la plante.*

41. 1. *Variation avec l'âge de la plante pour un même cycle végétatif*

Toutes les mesures ont été faites sur les plantes irriguées et, par type d'éclairage, dans des conditions constantes de température, d'humidité relative et d'ETP.

Avec *3 tubes*, pour un âge variant entre 2 mois et 2 mois 1/2 on n'observe aucune fluctuation de la pression de succion dont la valeur moyenne est 2,93 atmosphères.

Avec *6 tubes*, les valeurs observées sont les suivantes :

	P_s
Plantes de 1 mois à 1 mois 1/2	2,9
Plantes de 3 mois	2,6

41. 2. *Variation avec le cycle végétatif.*

Deux cycles successifs (4 et 5) ont été étudiés sur les dactyles irrigués dans des conditions ambiantes constantes pour le même nombre de tubes employés.

	Cycle	Age	Ps
12 tubes	4	1 mois à 1 mois 1/2	3,8
	5	3 mois	4,0
6 tubes	4	2 mois	3,2
	5	3 mois	2,2

Les différences observées ne sont pas significatives.

En conclusion, il est possible d'assurer toute garantie pour des études comparatives reposant sur la valeur de la pression de succion en utilisant un matériel végétal d'au moins 1 mois d'âge, même sur des cycles végétatifs différents à condition que les facteurs du milieu ambiant soient constants. Quant à l'éclairement, bien que les résultats précédents ne mettent pas en évidence de différence significative entre les types expérimentés, nous pensons qu'il doit être suffisant pour assurer à la plante de plus grandes possibilités de photosynthèse.

42. *Variation avec les facteurs climatiques.*

Cette étude a été poursuivie sur les dactyles irrigués du cycle n° 5, d'âge compris entre 2 et 3 mois. Les résultats suivants montrent que l'éclairement semble croître avec la pression de succion :

Éclairement (en lux)	3 180		5 160		6 670		9 540	
E T P (mm)	1,3	1,9	1,8	2,05	1,95	1,9	3,2	3,3
Ps (plantes irriguées)	3,05	3,05	2,2	3,95	3,5	2,6	4,65	4,65

5. *Variation de la pression de succion des feuilles avec l'humidité du sol*

Quand l'humidité du sol décroît à partir de la capacité au champ, la pression de succion des feuilles de dactyle soumis au dessèchement semble d'abord quasi stable en raison de l'imprécision de la méthode, bien qu'en réalité elle doive croître légèrement. Elle s'élève ensuite brusquement et devient significativement supérieure à celle des dactyles irrigués, en dessous d'une valeur limite de l'humidité du sol. Celle-ci semble un peu plus élevée pour l'éclairement maximum que pour les autres. Nous appellerons « pression de succion critique » cette valeur de la pression de succion dont le tableau 3 reproduit les ordres de grandeur.

TABLEAU 3

Relation entre la pression de succion critique et l'humidité du sol.

Eclairement (en lux)	H_2O limite du sol		Variation de succion critique
	%	*p*F	
3 180	19,3	3,54	$3,5 < Ps < 6,6$
5 160	20,4	3,45	$3,0 < Ps < 4,0$
6 670	19,2	3,55	$3,7 < Ps < 6,5$
9 540	21,0	3,40	$3,3 < Ps < 7,5$

Cette gamme des pressions de succion critiques paraît assez étalée. Elle correspond aux valeurs expérimentales les plus faibles à partir desquelles la pression de succion des feuilles dans les pots en dessèchement était significativement supérieure à celle obtenue dans les pots témoins.

DISCUSSION

I. *Vérification des relations théoriques entre la pression de succion, l'humidité du sol et les facteurs évaporants*

II. *Relation théorique entre la pression de succion, l'humidité du sol et les facteurs évaporants.*

Dans une étude antérieure (1964) nous avons précisé la liaison théorique entre la pression de succion, le potentiel de l'eau dans le sol et l'évapotranspiration. Rap-

pelons que la pression de succion P_s est une fonction de l'humidité du sol et du pouvoir évaporant de l'air. Cette relation peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$V\ P_s = \Psi(H) + k_1 \frac{KL}{\lambda} \cdot \frac{E}{M} + k_2\ E \qquad (1)$$

où V = volume spécifique de l'eau.
Ψ (H) = Potentiel de l'eau dans le sol.
k_1, k_2, K = constantes.
λ = Coefficient de conductibilité du sol pour l'eau.
M = Masse de sol soumise au dessèchement.
L = Longueur de parcours du centre à la périphérie de la maille.
E = Evapotranspiration réelle.

Pour M. HALLAIRE (1964) la fermeture des stomates intervient quand la pression de succion dans la feuille (P_s) atteint une valeur critique $(P_s)_c$. Cette valeur est obtenue pour un débit de l'eau dans la plante correspondant à une évaporation critique E_c donnée pour :

$$E_c = \frac{(VP_s)_c - \Psi(H)}{\frac{k_1 KL}{\lambda M} + k_2} \qquad (2)$$

Le débit d'eau critique peut être obtenu, soit pour de fortes valeurs de ETP, soit, comme le montre la formule (2), quand H, λ et M sont faibles ou quand L est grand.

12. *Relation avec l'évapotranspiration pour un potentiel constant et faible de l'eau dans le sol.*

Si l'on considère les *dactyles irrigués*, pour lesquels le potentiel de l'eau est faible et constant, la pression de succion varie uniquement avec l'évapotranspiration (fig. 2). La corrélation entre ces deux variables est hautement significative, ainsi que la droite de régression dont l'équation est :

$$P_s = 1{,}665 + 0{,}632\ ETP \qquad (3)$$

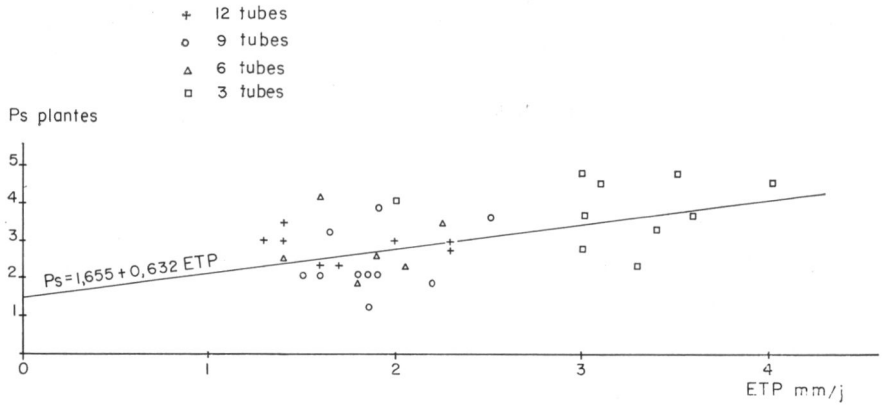


FIG. 2. — *Relation entre la pression de succion et l'évapotranspiration potentielle dans le cas des dactyles irrigués*

L'ordonnée à l'origine est proportionnelle au potentiel de l'eau dans le sol.

Dans le travail antérieur déjà cité (1964) nous avions émis l'hypothèse que, à partir de l'intervention de la régulation stomatique qui ne laisserait subsister que la transpiration cuticulaire, la droite traduisant la variation de P_s en fonction de ETP aurait un coefficient angulaire environ 10 fois plus faible que celui de la droite liant P_s et ETP en régime de transpiration normale. Il est possible que dans notre expérience les valeurs de ETP ne soient pas assez élevées pour provoquer la régulation stomatique. Pourtant, si cette régulation s'était produite, il ne serait pas possible de la vérifier car nos résultats expérimentaux représentés sur la figure 2 sont trop dispersés pour qu'une courbe réelle autre qu'une droite de régression puisse être tracée.

Notons toutefois qu'il n'est pas exclu qu'une action propre de l'éclairement sur la régulation stomatique se surimpose à l'effet de l'ETP.

13. *Relation avec l'évapotranspiration à différents niveaux d'humidité du sol.*

La figure 3 représente la variation de P_s en fonction de ETP pour différents niveaux d'humidité du sol. Jusqu'à pF 3,4 environ (H_2O = 21 p. 100), la variation

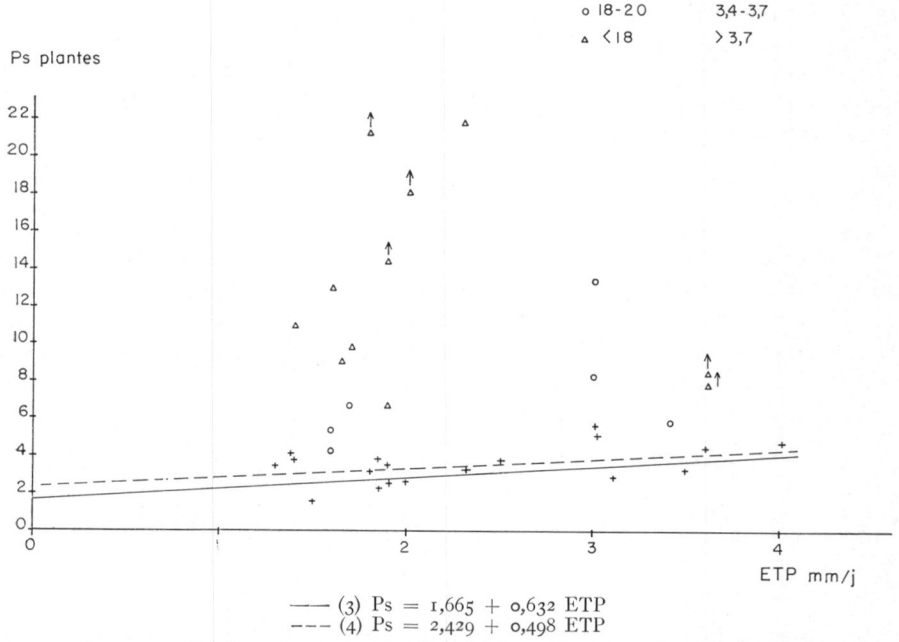


FIG. 3. — *Relation entre la pression de succion et l'évapotranspiration potentielle à différents niveaux d'humidité du sol dans le cas des dactyles soumis au dessèchement*

semble linéaire entre les deux variables, traduisant un léger accroissement de la pression de succion dans les feuilles, sans limitation importante de la fourniture en eau par le sol.

La droite de régression (4) $P_s = 2{,}429 + 0{,}498$ ETP n'est pas significativement différente de la précédente (3) obtenue pour les dactyles irrigués.

D'ailleurs, pour un pF inférieur à 3,4, la pression de succion des feuilles dans les pots en dessèchement n'est jamais significativement supérieure à celle des plantes des pots irrigués quotidiennement.

Pour des pF supérieurs à 3,4, les points représentatifs peuvent être regroupés en deux zones correspondant, l'une à pF 3,4 à 3,7 (H_2O = 20 à 18 p. 100), l'autre à pF 3,7 à 4,2 (H_2O = 17 à 15 p. 100).

Le nombre insuffisant de points expérimentaux (dans un certain nombre de cas nous ne connaissons pas la valeur précise de P_s, mais seulement sa valeur minimum : $P_s > N$ atmosphères) ne permet pas de tracer des droites expérimentales, mais il apparaît nettement que la pression de succion croît fortement avec le potentiel de l'eau dans le sol pour une même valeur de ETP.

Cette constatation apporte une confirmation aux considérations théoriques que nous avons formulées en 1964, d'après lesquelles le coefficient angulaire de la droite (Ps, ETP) augmente fortement quand l'humidité du sol diminue. (En effet, dans la formule (1) λ décroît corrélativement à H).

14. *Relation avec l'humidité du sol.*

La pression de succion étant fonction de l'inverse de l'humidité du sol, nous considérerons la variation de $\frac{100}{Ps}$ en fonction de H.

Pour l'ensemble des valeurs expérimentales, il existe une corrélation positive et hautement significative qui traduit la relation entre les deux variables. L'équation de régression, non extrapolable aux limites, s'exprime par :

$$\frac{100}{Ps} = 17{,}244 + 1{,}938\ H \qquad (5)$$

Pour tenter de faire apparaître l'influence de l'ETP, nous avons considéré les résultats correspondant à une ETP, d'une part inférieure à 3 mm/j, d'autre part supérieure à 3 mm/j. Dans les deux cas, la corrélation reste significative mais les coefficients angulaires (a) des droites de régression sont différents, traduisant l'effet de l'ETP sur l'accroissement de la pression de succion :

$$\text{ETP} < 3 \text{ mm/j} \qquad a = 2{,}113\ x$$
$$\text{ETP} > 3 \text{ mm/j} \qquad a = 1{,}038\ x$$

2. *Signification de la pression de succion dans la manifestation du besoin en eau des plantes*

21. *Allure des courbes de dessèchement.*

Les courbes de la figure 1 sont à rapprocher de celles que M. HALLAIRE (1960) a obtenues en faisant varier la masse de terre M des pots. Dans notre expérience, M étant constant, la variation observée est uniquement fonction de E, et l'humidité critique (valeur de l'humidité du sol au décrochement des courbes, c'est-à-dire à la réduction de transpiration) est un peu plus élevée pour 12 tubes que pour les éclairages inférieurs.

22. *Relation entre l'humidité critique de pression de succion et l'humidité critique de réduction de transpiration.*

L'examen des résultats des tableaux 2 et 3 et de la figure 1 et surtout nos mesures quotidiennes montrent une certaine hystérésis entre le début de la transpiration réduite et le décrochement de la pression de succion. Cette dernière s'accroît brusquement pour une humidité du sol variable suivant les conditions d'ETP et, le lendemain, nous notons une réduction de transpiration.

Ces résultats confirment bien le processus de régulation stomatique : quand l'alimentation hydrique devient moins aisée, la teneur en eau des cellules diminue, accroissant leur pression osmotique, donc la pression de succion, et provoquant la fermeture plus ou moins complète des stomates ; la transpiration stomatique se trouve ainsi réduite. Ce processus est vraisemblablement rapide et le décalage est peut-être inférieur à 1 jour, mais nos mesures de laboratoire qui sont quotidiennes ne peuvent en faire apparaître la durée exacte.

3. *Comparaison des pressions de succion obtenues dans les conditions naturelles et en chambres de végétation*

Nos résultats précédents (1961-1964) obtenus sur dactyle cultivé en plein champ faisaient état de pressions de succion comprises entre 8 et 25 atmosphères selon les conditions d'humidité du sol, avec une valeur critique de l'ordre de 10 atmosphères. Les mesures actuelles en chambre de végétation se situent à un niveau bien inférieur pour les plantes irriguées dont les pressions de succion aux faibles ETP atteignent en moyenne 2 à 3 atmosphères. Par contre, dans les pots fortement desséchés, la pression de succion dépasse 22 atmosphères. Ces résultats semblent donc confirmer nos premières conclusions (1964) laissant supposer que les stomates sont déjà fermés en plein champ dès 9 h 30. La pression de succion critique que nous supposions égale à 9 à 10 atmosphères serait en réalité inférieure.

Il convient toutefois de signaler qu'en milieu artificiel, il est difficile d'obtenir un éclairement important. Les possibilités offertes par l'emploi des tubes fluorescents permettent de travailler dans une zone où la photosynthèse n'est pas toujours optimale.

En outre, si l'on utilise l'éclairage comme moyen pour faire varier l'ETP, on ne peut atteindre des valeurs très élevées, ce qui rend difficile de cette façon l'étude de l'action des facteurs climatiques.

CONCLUSION

A l'issue de ce travail nous pouvons d'abord conclure sur la valeur de la méthode de détermination de la pression de succion. Le travail analytique relativement important que nous avons réalisé ne nous semble pas en rapport avec les résultats obtenus, en raison de l'imprécision qui n'autorise pas une interprétation vraiment rigoureuse des données.

Toutefois nos résultats sont dans l'ensemble assez proches de ce que laissait prévoir la relation théorique entre la pression de succion, l'évapotranspiration poten-

tielle et l'humidité du sol. Ils montrent la liaison entre la pression de succion critique et la réduction de la transpiration. Ils permettent en outre de confirmer et de compléter des données obtenues en plein champ.

SUMMARY

PHYSIOLOGICAL MEANING OF THE SUCTION TENSION OF LEAVES WITH RESPECT TO THE ECOLOGY OF THE PLANT

To test the aqueous and climatic factors that cause a variational change of the suction tension of leaves of dactylis, an experiment was performed in a growth test-chamber. The suction tension, measured within an accuracy of from 0.5 to 2 atmospheres, rises with the Potential-Evapo-Transpiration (ETP), without evincing, however, cuticular transpiration. The suction tension rises concurrently with the water deficiency of the soil. The value of the suction tension that brings about stomatic control also augments with the ETP, whose critical moisture level is slightly higher than that of diminished transpiration. Very low suction-tension values are obtainable in growing-on test chambers, whereas field tests depend on the weather conditions obtaining previously. The suction-tension procedure is, however, not accurate enough to provide truly reliable evaluations.

ZUSAMMENFASSUNG

PHYSIOLOGISCHE BEDEUTUNG DES DRUCKES DES SAFTSTROMS IN DEN BLATTERN IM ZUSAMMENHANG MIT DER ÖKOLOGIE DER PFLANZE

Um die klimatischen und hydrolytischen Faktoren, die die Druckveränderung des Saftstroms in den Knaulgrasblättern bedingen, zu kontrollieren, wurden Versuche in einer Gewächshausanlage durchgeführt. Der Druck des Saftstroms, der mit einer Präzision von 0,5 bis 2 Atmosphären gemessen wurde, wächst mit potentielle Evapo-Transpiration (ETP) ohne dass es jedoch möglich war, hierbei die Häutchenausdünstung zugrunde zu legen. Wächst der Wassermangel des Bodens, so steigt der Druck des Saftstroms. Der die Porenregulierung hervorrufende kritische Wert des Druckes übertrifft ein wenig die kritische Feuchtigkeit der Ausdünstungsverminderung. Die in Gewächshausanlagen durchgeführten Versuche ermöglichen sehr schwache Druckwerte, während die auf offenem Felde erfolgten Messungen von den vorhergehenden Witterungsverhältnissen abhängig sind. Die Bestimmungsmethode des Saftstrom-Druckes hat eine viel zu geringe Genauigkeit, um daraus endgültige Schlüsse zu ziehen.

РЕЗЮМЕ

Физиологическое значение всасывающей силы листьев в связи с экологией растения.

С. МЭРИО.

Для проверки климатических и водных факторов об'уславливающих изменения всасывающей силы листьев ежи, автор провел опыт в вегетационном домике. Всасывающая сила, измеренная с точностью от 0,5 до 2 атмосфер, возрастает с увеличением потенциальной эвапо-транспирации, не создавая при этом возможности выявления кутикулярной транспирации. С возрастанием водного дефицита почвы всасывающая сила увели-

чивается. Размеры критической всасывающей силы, вызывающей регуляцию устьиц, возрастают с увеличением потенциальной эвапотранспирации. Критическая влажность всасывающей силы намного выше критической влажности ослабления транспирации. Определения проведенные в вегетационном домике разрешают измерение очень малых величин всасывающей силы, в то время как в условиях полевого опыта величины эти зависят от предшествовавших метеорологических условий. Метод определения всасывающей силы еще недостаточно точен, чтобы позволить неоспоримые и достаточно точные истолкования.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BONNER J., GAISTON A. W., 1958. *Principles of plant physiology.* 80-89. (W. A. Freeman and Co-San Francisco).

HALLAIRE M., 1960. Problèmes du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour les végétaux. *Ann. Physiol. vég.*, **2**, 119-130.

HALLAIRE M. 1964. Le Potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement, 27-62. *L'eau et la production végétale*, I. N. R. A.

LEMÉE G., LAISNÉ G., 1951. La méthode réfractométrique de mesure de la succion. Comparaison avec la méthode des lanières d'Ursprung. Applications physiologiques et écologiques. *Rev. gén. Bot.*, **58-59**, 336-347.

LEMÉE G. 1956. Aspects écologiques de la régulation stomatique de la transpiration. *Bull. Soc. fr. Physiol.*, **2**, 1, 29-38.

MÉRIAUX S., PERREY C. ,1961. Observations sur l'irrigation du Dactyle en sol de réserve hydrique moyenne. *Ann. agron.*, **12** (1), 81-86.

MÉRIAUX S., 1964. Essai d'interprétation des mesures de pression de succion des feuilles, 349-356. *L'eau et la production végétale*, I. N. R. A.

PARCEVAUX S. de, 1961. Tests physiologiques permettant de contrôler l'alimentation en eau des plantes. *Ann. agron.*, **12** (1), 75-80.

PARCEVAUX S. de, 1964. Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu, 63-150. *L'eau et la production végétale*, I. N. R. A.

Ann. agron., 1967, **18** (6), 653-667.

ESSAI DE DOSAGE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX DANS LES VÉGÉTAUX

I. — Soufre. dosage chimique (bombe a oxygène) et dosage par fluorescence X

Nicole SOUTY et R. GUENNELON

avec la collaboration technique de Colette Rode

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Est, 84 - Montfavet
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Les auteurs étudient la possibilité de doser le soufre dans les végétaux, d'une part par oxydation dans la bombe à oxygène, suivie d'une turbidimétrie, d'autre part par fluorescence X. Ils essaient de réaliser la mise au point de ces deux méthodes et comparent les résultats obtenus sur plusieurs échantillons.

INTRODUCTION

Le dosage du soufre dans les végétaux par les méthodes chimiques, présente de nombreuses difficultés, tant au point de vue mise en solution de l'échantillon, qu'au point de vue dosage de cet élément. Or, divers auteurs ont montré l'universalité de la présence du soufre dans les végétaux, mais aussi la variabilité des teneurs ; de plus, les proportions de soufre minéral et de soufre organique peuvent être très différentes et les techniques de minéralisation par voie sèche, lorsqu'elles sont employées sans précaution, aboutissent fréquemment à des pertes portant sur la fraction liée à la matière organique. Le tableau 1 donne quelques indications sur ces teneurs exprimées en milligrammes de soufre pour 1 gramme de matière sèche (Vincent, Sarazin et Herviaux, 1936).

Notre travail a porté sur la comparaison des résultats obtenus sur de nombreux végétaux par différentes méthodes purement chimiques (oxydation par voie humide, oxydation dans la bombe, suivies de dosage de l'anion par turbidimétrie et conductimétrie) et par fluorescence X ; en effet, cette dernière méthode permet un dosage

TABLEAU I

Répartition : soufre minéral — soufre organique pour divers végétaux

	Soufre organique °/oo	Soufre minéral °/oo	Soufre total °/oo
Colza	3,05	2,76	5,81
Trèfle violet	1,02	0,28	1,30
Luzerne	1,59	0,51	2,10
Blé — Grain	1,55		1,58
Blé — Paille	0,44		0,68
Pommes de terre — Feuilles	2,87	1,75	4,62
Pommes de terre — Tiges	0,67	2,07	2,74
Pommes de terre — Tubercules	0,63	0,53	1,16
Betteraves — Feuilles	2,20	2,00	4,20
Betteraves — Racines	0,71	1,16	1,87
Choux — Feuilles	4,76	3,45	8,21
Choux — Troncs	1,59	2,41	4,00

plus rapide et plus commode comme l'a montré GUENNELON (1966) ; de plus, la possibilité d'éviter la calcination élimine les pertes afférentes à cette opération. Un petit nombre d'auteurs seulement semble s'être intéressé au dosage du soufre dans les végétaux par fluorescence X ; MITCHAM et *al.* (1964), ont dosé cet élément dans le coton et ont trouvé les valeurs rassemblées dans le tableau 2. Dans cet exemple, nous remarquons nettement le caractère déficitaire des dosages chimiques par rapport à la fluorescence X.

TABLEAU 2

Analyses du soufre par fluorescence X sur du coton
(MITCHAM *et al.*, 1964)

	Dosage chimique °/oo	Fluorescence X °/oo
A	0	0,2
B	6,2	7,4
C	7,2	9,0
D	7,2	9,0

I. — RAPPELS DES MÉTHODES DE DOSAGE DU SOUFRE

Les méthodes utilisées pour le dosage du soufre dans les substances organiques comprennent deux étapes : la mise en solution du soufre sous forme d'ion SO_4^{--} et le dosage de cet ion.

Pour la mise en solution, de nombreuses techniques ont été utilisées (CARIUS, 1860-1870; HALLETT et KNIPERS, 1940; HOREISCHYS, 1947; KUCK, 1940; STEYREMARK, 1949-1951) ; nous notons aussi la méthode BENEDICT (ALICINO, 1941) consistant en une évaporation et une calcination de l'échantillon en présence de $(NO_3)_2Cu$ et de ClO_2K. Cependant, l'oxydation ou la réduction par voie gazeuse sont le plus souvent employées ; certains auteurs (ALICINO, 1958 ; LYSIJ et ZAREMBO, 1958), utilisent la méthode oxydante dite du flacon d'oxygène de SCHÖNIGER (1955), qui consiste à brûler l'échantillon dans un morceau de papier-filtre sans cendre, dans un erlenmeyer rempli d'oxygène et contenant de l'eau oxygénée ; la combustion est complète en quelques secondes et les produits obtenus sont absorbés par la solution. Les équations illustrant cette méthode sont donc :

$$S + O_2 \rightarrow SO_2,SO_3$$
$$SO_2 + SO_3 + H_2O_2 + H_2O \rightarrow SO_4H_2$$

D'autres auteurs (ELECK et HILL, 1933; ALICINO, 1941), effectuent la combustion dans une bombe de PAAR : du peroxyde de sodium mélangé à d'autres agents oxydants explose pour transformer le composé soufré en sulfate alcalin ; une variante de cette technique, éliminant la nécessité d'employer de grandes quantités de sels, est réalisée dans la bombe à oxygène (WAGNER et MILES, 1947).

Parmi les méthodes réductrices, nous avons relevé une pyrolyse du composé soufré dans un courant d'hydrogène pour former de l'hydrogène sulfuré (TER MEULEN, 1922) et une transformation du soufre en sulfure de potassium en présence de potassium chauffé en tube scellé (ZIMMERMAN, 1947).

Pour le dosage du soufre, à partir des solutions ainsi obtenues, nous avons noté la gravimétrie (ELECK et HILL, 1933), la colorimétrie en présence de chloranilate de baryum (LYSYJ et ZAREMBO, 1959 ; MAZOYER, 1966), la titration de l'acide sulfurique formé, par une base (LYSYJ et ZAREMBO, 1958 ; WAGNER et MILES, 1947), la titration directe par du perchlorate de baryum en présence de thorine comme indicateur (ALICINO, 1958 ; FRITZ et YAMANURA, 1955) (méthode essentiellement valable pour le dosage de très faibles teneurs en soufre : 10 p.p.m. environ) ; de plus, la conductimétrie semble être parfois intéressante (RICHARD, 1967).

Cependant, la technique de dosage le plus souvent employée semble être la turbidimétrie (KROBER, HOWELL, 1958 ; BLANC, BERTRAND et LIANDIER, 1955 ; GARRIDO, 1964) : cette méthode est rendue simple et rapide d'une part grâce à l'amélioration de la sensibilité des photomultiplicateurs et d'autre part, grâce à l'existence des molécules tensio-actives, qui, ajoutées au milieu, stabilisent les suspensions des substances insolubles.

II. — DOSAGES EFFECTUÉS SUR DU MATÉRIEL VÉGÉTAL

A — *Dosages chimiques*

1° *Mise en solution.*

La mise en solution de l'échantillon peut se faire après une attaque par les acides nitrique et perchlorique (BLANCHAR, REHM et CALDWELL, 1965), mais le plus souvent elle résulte d'une oxydation par voie humide, c'est-à-dire d'une digestion du végétal par une solution de nitrate de magnésium suivie d'une calcination (KROBER, HOWELL, 1958) (méthode officielle AOAC). De plus, la présence de magnésium a tendance à augmenter la sensibilité du dosage par turbidimétrie ; cependant, ce processus d'oxydation est long et délicat.

Par contre, l'oxydation dans la bombe (bombe calorimétrique Prolabo de 350 cm^3), présente de nombreux avantages, simplicité et rapidité essentiellement.

2° *Dosage du soufre.*

Les méthodes analytiques peuvent être classées en trois groupes : gravimétrie, volumétrie et spectrophotométrie : toutes ces méthodes ont d'ailleurs été revues par MILLET (1963).

Pour un travail de routine, la gravimétrie présente l'inconvénient d'être pénible et longue ; les dosages volumétriques ne sont pas entièrement satisfaisants car le point final de la titration est distingué difficilement, mais d'après BURRIEL et GOMEZ (1955), les méthodes colorimétriques sont les plus appropriées. Cependant, la turbidimétrie basée sur la mesure de l'intensité transmise à travers les particules de sulfate de baryum en suspension, semble être la meilleure méthode (KROBER et HOWELL, 1958 ; BLANC, BERTRAND et LIANDIER, 1955) ; (SINGER, 1961 ; BUTTERS et CHENERY, 1959).

3° *Méthodes utilisées au laboratoire.*

Nous avons adopté le mode opératoire constitué par une oxydation à la bombe et un dosage par turbidimétrie.

Un poids connu de végétal (1 g à 1,5 g) est pastillé par compression ; cette pastille est déposée dans un creuset en silice placé à l'intérieur de la bombe qui contient environ 50 cm^3 d'eau. Nous remplissons la bombe d'oxygène à une pression de 25 kg approximativement et faisons passer le courant dans le fil de clavecin tendu entre les électrodes : la combustion de la pastille se fait alors par l'intermédiaire d'un petit morceau de papier-filtre sans cendre placé sur le fil de clavecin. Après refroidissement et dégazage lents, nous recueillons la solution dans laquelle nous pouvons doser le soufre (et éventuellement le chlore).

Pour le dosage proprement dit, nous pouvons employer deux processus légèrement différents suivant le domaine de concentrations :

— pour les fortes teneurs (0 à 16 mg de S/litre), nous nous sommes inspirés de la méthode de BLANC, BERTRAND et LIANDIER (1955) et de GARRIDO (1964), qui

préconisent l'emploi d'agents tensio-actifs pour maintenir la suspension de sulfate de baryum. A un volume mesuré de la solution issue de la bombe, nous ajoutons 2 cm³ de solution de chlorhydrate d'hydroxylamine (pour réduire le fer, Fe^{+++}, éventuellement présent), 2 g de chlorure de baryum et 5 cm³ d'une solution de *Tween* 20 (polyoxyéthylène sorbitan monolaurate) et nous complétons à 50 cm³ avec de l'eau. Après avoir agité et laissé reposer pendant une demi-heure, nous mesurons à l'aide du spectrophotomètre (type Beckman DB), l'absorption à 440 mμ. Pour obtenir la valeur de la teneur en soufre des échantillons, nous comparons leur absorption à celle d'une gamme faite à partir de sulfate d'ammonium.

— Pour les faibles teneurs (0 à 4 mg/litre), nous avons appliqué le mode opératoire de SNELL et SNELL (1959) ; la précipitation du sulfate de baryum se fait à pH = 1 par 0,420 g de chlorure de baryum, les particules sont maintenues en suspension par de l'alcool (méthanol ou éthanol) et la mesure de l'absorption est effectuée à 380 mμ.

En résumé, nous pouvons dire que certains détails sont à respecter pour une bonne mesure par turbidimétrie :

— la grosseur des grains de chlorure de baryum doit être telle qu'ils passent au tamis de 40 (0,45 mm), mais ne passent pas à celui de 60 (0,28 mm) ;

— après l'introduction du chlorure de baryum, il est indispensable d'attendre une demi-heure à trois quarts d'heure avant d'effectuer la mesure ; une étude cinétique a permis de constater que la suspension n'était stable qu'au bout de ce temps.

Sur certains végétaux, le soufre a pu être dosé par conductimétrie à partir de la solution issue de la bombe : nous avons titré les ions SO_4^{--} par une solution N =0,05 de chlorure de baryum : la conductivité de la solution varie brusquement lorsque tous les ions SO_4^{--} sont remplacés par les ions Cl^- : c'est la détermination de ce « point équivalent » qui permet d'atteindre la concentration en SO_4^{--}.

B — *Dosages par fluorescence X*

Une analyse aussi rigoureuse que possible, doit permettre la prévision des perturbations dues à la présence de Si, P, Cl, Ca et K en proportions variables dans les végétaux. En effet, d'une part le rayonnement du soufre est susceptible d'être excité partiellement par les raies de fluorescence de Ca, K et Cl, ce qui entraînerait une erreur, par excès, sur la détermination de la concentration en soufre ; d'autre part, la raie S K_α est fortement absorbée par les atomes de P et Si, absorption qui conduit à des erreurs par défaut. De plus, les atomes de Cl, K et Ca, peuvent en absorbant une partie du rayonnement excitateur, diminuer encore la mesure de S K_α. Il est donc nécessaire de connaître la composition de la matrice ou tout au moins la façon de s'affranchir de ses effets.

A partir de l'expression générale de l'intensité d'une raie de fluorescence, GUENNELON (1966) a établi une formule reliant la concentration en soufre avec les teneurs des divers composants, après avoir tamponné les variations par de la magnésie ajoutée au végétal. La magnésie joue le rôle de diluant (atténuation des effets inter-éléments dus à K, Ca, Cl, etc.) et d'alourdisseur (son absorption par la raie S K_α étant plus importante que celle des atomes de C, O et N, constituant la matière végétale organique).

Si p_x, p_i et p_m sont les concentrations respectives de l'élément à doser, des

divers éléments minéraux, de la fraction organique et magnésienne, l'intensité de la raie de fluorescence s'exprime par :

$$E_x = \frac{p_x}{ap_x + \sum_i b_i p_i + cp_m} \tag{1}$$

avec $$p_x + p_i + p_m = 1$$

On peut écrire encore :

$$E_x = \frac{p_x}{Ap_x + \sum_i B_i p_i + c} \tag{2}$$

$$E_x^{-1} = A + \left(\sum B_i p_i + c\right) p_x^{-1} \tag{3}$$

A partir de cette relation et d'une gamme réalisée avec des pastilles contenant de la magnésie (la même quantité que celle ajoutée à 2 g de végétal, soit 0,5 g), des quantités variables connues de $SO_4(NH_4)_2$ et le complément à 2,5 g en cellulose, nous pouvons atteindre les valeurs des coefficients A et $\left(\sum_i B_i p_i + c\right)$, en traçant la droite représentant E_{x-1} mesuré en fonction de p_{x-1}. Pour déterminer la teneur en soufre d'un échantillon, il suffit alors de porter le nombre d'impulsions recueillies sur le pic de la raie $K\alpha$ dans la relation (3).

Cependant, un problème très important se pose lors de la fabrication des standards quant au choix du composé soufré convenant le mieux. Il semble, en effet, que la présence de magnésie dans les pastilles, entraîne une variation du nombre d'impulsions enregistrées sur le pic de S K_α au cours du temps ; cette constatation a été faite pour les gammes réalisées à partir de $SO_4(NH_4)_2$, pour lesquelles on peut penser à une modification due au déplacement de l'ion NH_4^+ par l'ion Mg^{++}, sous l'influence de l'humidité atmosphérique. De même, les gammes composées de soufre élémentaire subissent également une évolution assez délicate à expliquer. C'est pourquoi nous avons utilisé par la suite, une gamme constituée par du sulfate de magnésium $SO_4Mg,7H_2O$ calciné à 650° et qui ne semble pas se détériorer après plusieurs passages dans le rayonnement X.

Les manipulations sont effectuées sur le matériel végétal séché et broyé ; le soufre ayant un numéro atomique peu élevé (Z = 16), donc un rendement de fluorescence faible, certaines précautions doivent être prises pour une bonne analyse. La granulométrie doit être aussi fine que possible, l'homogénéité excellente et la géométrie de l'échantillon constante ; ces conditions sont satisfaites par l'emploi d'un broyeur pour les échantillons et d'une presse pour fabriquer les pastilles. De plus, les mesures sont faites sous vide, l'excitation est produite par une anticathode de Cr et les impulsions recueillies dans un compteur à flux gazeux. Les appareils utilisés sont de marque Siemens : spectromètre manuel et spectromètre séquentiel «SRS ».

Les pastilles fabriquées pour le spectromètre manuel contiennent 2 g de végétal et 0,5 g de magnésie ; pour le spectromètre SRS, elles sont constituées de 1 g de végétal, 1 g de magnésie et 1 g de cellulose, la diminution de la part de l'échantillon dans la pastille étant rendue possible par l'augmentation de la sensibilité de cet appareil. Dans celui-ci, la rotation de l'échantillon efface, dans une certaine mesure, les hétérogénéités lorsqu'elles existent.

La durée du comptage des impulsions est de 5 fois 1 minute avec le spectromètre manuel et de 1 minute avec le SRS. Cependant, avec ce dernier appareil, il semblerait que pour les faibles teneurs en soufre, un comptage de 1 minute soit insuffisant.

Les conditions opératoires sont :

— pour le spectromètre manuel : 35 kV, 30 mA pour l'alimentation du tube à rayons X.

Canal de discrimination : seuil 7 volts, largeur : 11 volts.
Tension du compteur à flux gazeux : 1995 volts.
Cristal : Gypse.
Fentes du compteur : 0°15.
Pic de S K_α : 41°39.

— pour le spectromètre séquentiel (SRS) : 35 kV, 34 mA pour l'alimentation du tube à rayons X.

Canal de discrimination : seuil 13 volts, largeur : 15 volts.
Tension du compteur à flux gazeux : 1956 volts.
Cristal : Pentaerythrite.
Fentes du compteur : 0°15.
Pic de S K_α : 75°76.

C — *Comparaison des divers dosages*

Pour connaître la validité des résultats obtenus par fluorescence X, nous avons envisagé une comparaison portant sur 56 échantillons provenant de divers laboratoires et sur 14 échantillons rassemblés et préparés au laboratoire : tous les résultats sont groupés dans les tableaux 3 et 4. Les valeurs des teneurs en soufre des échantillons des différents laboratoires ont été déterminées par voie chimique de la façon suivante :

I : Bombe et gravimétrie
II : Oxydation par $(NO_3)_2Mg + NO_3H$ et turbidimétrie
III : Méthode A. O. A. C. modifiée à l'I. R. H. O.
IV : Oxydation par $(NO_3)_2Mg$ et gravimétrie
V : Oxydation par $(NO_3)_2Mg$ et turbidimétrie,

et de notre côté, nous avons effectué une oxydation à la bombe suivie d'un dosage par turbidimétrie sur la plupart de ces végétaux (méthode exposée au paragraphe II 3)

Les valeurs par fluorescence X ont été obtenues par le spectromètre manuel à partir d'une gamme de $SO_4(NH_4)_2$, d'une part par lecture directe sur la droite d'étalonnage (1) et d'autre part par calcul à partir de la formule établie (2) ; ceci concerne les groupes I et II d'échantillons.

Les groupes III, IV et V, ont été étudiés à l'aide du SRS et d'une gamme faite soit à partir du S en fleur, soit à partir de SO_4Mg : les valeurs ont été lues directement sur la droite d'étalonnage.

Les échantillons du groupe VI ont pu être passés sur les deux appareils.

Nous constatons tout d'abord que les valeurs (1) sont toujours plus faibles que les valeurs (2) et qu'elles sont en assez bon accord avec celles trouvées par turbidimétrie. Par ailleurs, nous pouvons dire, que, dans l'ensemble, l'accord entre valeurs de la fluorescence (résultats lus sur la droite (1) et atteints par gamme de S en fleur

TABLEAU 3 *Résultats obtenus sur des comparaisons inter-laboratoires*

Échantillons (S °/oo)		Résultats laboratoire expéditeur	Bombe et turbidimétrie	Fluorescence X		
				Gamme $SO_4(NH_4)_2$		Gamme SO_4Mg Gamme S fleur
				Lecture sur droite (1)	Calcul (2)	Lecture sur droite (3)
Herbe	I	1,88	1,58	1,75	2,01	
Herbe		2,82	2,43	2,63	3,15	
Herbe		3,36	3,93	3,63	4,02	
Herbe		1,25	1,07	1,06	1,30	
Herbe		2,60	2,91	2,88	3,25	
Feuilles de Pommes de terre		1,39	1,82	1,75	2,04	
Feuilles de Pommes de terre		1,80	2,01	2,38	2,58	
Tubercules		0,68	0,56	0,38	0,46	
Tubercules		0,82	0,82	0,88	1,03	
Colza (paille)		1,07	0,65		0,83	
Colza (paille)		1,50	2,47		2,98	
Arachide *Niangoloko*	II	2,30	2,62	2,56	2,42	
Arachide *Daron*		2,28	2,32	2,53	2,37	
Palmier T_2		2,26	1,85	2,19	2,18	
Cocotier		2,08	1,94	2,38	2,18	
Poireaux	III	3				2,80
Colza		2,11				2,0
Colza		1,76				2,14
Tomates (tiges et feuilles)		10,18				9,15
Tomates (tiges et feuilles)		6,18				6,11
Blé (Chanvre)		0,56				0,12
Blé (Chanvre)		1,0				0,80
Blé (Farine)		1,16				0,85
Blé (Farine)		1,44				1,15
Lin (Plante entière)		2,20				2,55
Lin (Plante entière)		1,76				1,40
Lin (Plante entière)		1,24				1,25
Tomates (Feuilles) S total	IV	1,17	1,04			1,18
Tomates (Feuilles) S insol.		0,50				0,30
Tomates (Tiges) S total		0,34	0,26			0,24
Tomates (Tiges) S insol.		0,10	0,08			0,06
Tomates (Racines) S total		0,61				0,60
Tomates (Racines) S insol.		0,26				0,23
Maïs (Feuilles) S total		0,25	0,24			0,24
Maïs (Feuilles) S insol.		0,09	0,08			0,08
Maïs (Tiges) S total		0,20	0,16			0,11
Maïs (Tiges) S insol.		0,05	0,04			0,03
Maïs (Racines) S total		0,64	0,51			0,58
Maïs (Racines) S insol.		0,32	0,25			0,29
Tomates (Feuilles vieilles) S total		2,81	2,67			2,70
Tomates (Feuilles vieilles) S insol.		2,35				2,41

(1) Valeurs lues sur la droite d'étalonnage.
(2) Valeurs calculées à partir de la formule (3).
(3) Valeurs lues sur la droite d'étalonnage (avec SRS).

TABLEAU 3 (*suite*)

Échantillons (S °/oo)		Résultats laboratoire expéditeur	Bombe et turbidimétrie	Fluorescence X		
				Gamme $SO_4(NH_4)_2$		Gamme SO_4Mg
				Lecture sur droite (1)	Calcul (2)	Gamme S fleur Lecture sur droite (3)
Navets (Feuilles)		9,63	7,28			9,36
Navets (Racines)		5,27	5,63			4,78
Carottes (Feuilles)		3,53	2,78			2,70
Carottes (Racines)			0,96			0,60
Choux (Feuilles)		16,49	18,48			16,70
Céleris-raves (Feuilles)		30,22	29,45			30,10
Céleris-raves (Têtes)			1,18			0,92
Céleris-raves (Racines)			1,44			1,40
Tomates (Tiges et feuilles)		15,31	12,96			15,62
Tomates (Fruits)		3,34	2,67			2,60
Piments (Tiges et feuilles)	V		4,61			3,62
Piments (Fruits)			2,49			2,50
Choux Bruxelles (Tiges et feuilles)		5,55	6,50			6,58
Choux Bruxelles (Partie commercialisable)		8,30	10,72			10,46
Choux Bruxelles (Racines)		5,68	5,64			5,70

(1) Valeurs lues sur la droite d'étalonnage (2) Valeurs calculées à partir de la formule (3).
(3) Valeurs lues sur la droite d'étalonnage (avec SRS).

TABLEAU 4 *Comparaison de diverses méthodes chimiques et de trois mesures par fluorescence X*

Échantillons (S °/oo)		Bombe et turbidimétrie	Bombe et conductrimétrie	Oxydation $(NO_3)_2Mg$ et turbidimétrie	Fluorescence X		
					Gamme $SO_4(NH_4)_2$		Gamme SO_4Mg
					Lecture sur droite (1)	Calcul (2)	Lecture sur droite (3)
Paille de riz		1,09	0,83		0,7	1,07	0,80
Choux-fleurs (Pommes)		6,94	8,6		7,5	7,89	6,25
Pommiers		2,62	3		3,05	3,38	2,38
Choux-fleurs (Feuilles)		9,92	9,3	12,86	10,8	11,16	9,63
Épinards		3,62			3,8	4,16	3,57
Riz (Grains)		0,94	1,4	1,29	0,95	1,30	0,95
Salades frisées	VI	5,14		6,17	5,45	5,73	
Pruniers(Feuilles)		1,68		1,75	1,75	2,10	1,55
Sainfoin		3,16		3,53	3,2	3,56	2,58
Carottes		1,41	1,6		1,65	1,98	
Betteraves fourragères		3,77		4,55	4,45	4,80	
Poireaux		1,89	2,2		2,2	2,56	2,15
Fèves (Feuilles)		3,37		3,10	3	3,37	2,82
Choux		6,62	6,7		6,75	7,08	

(1) Valeurs lues sur la droite d'étalonnage. (2) Valeurs calculées à partir de la formule (3).
(3) Valeurs lues sur la droite d'étalonnage (avec SRS).

et de SO_4Mg) et valeurs données par les dosages et différents laboratoires n'est pas toujours très satisfaisant ; par contre, l'accord est meilleur si nous comparons ces mêmes valeurs trouvées par fluorescence et celles du dosage chimique : bombe-turbidimétrie.

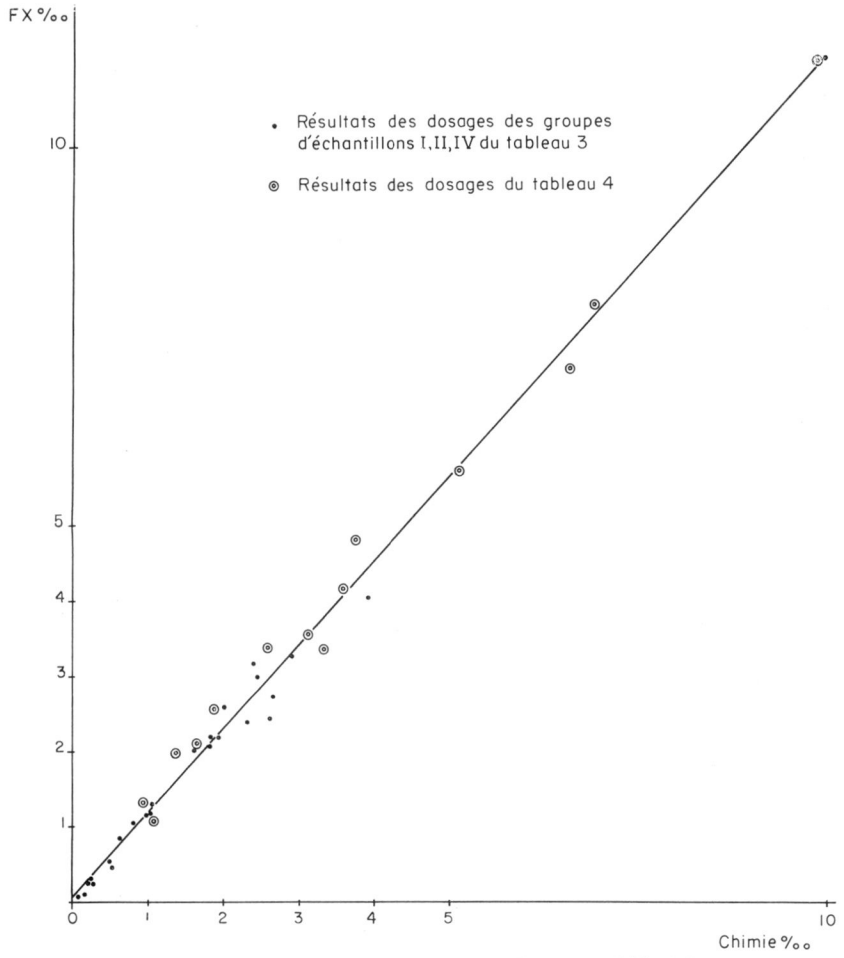


FIG. 1. — *Corrélation : Fluorescence X — Dosages turbidimétriques*

Cependant, nous avons établi l'équation de la droite de régression (fig. 1) des résultats calculés (2) et des résultats donnés par la gamme de S en fleur par rapport aux résultats du dosage : bombe-turbidimétrie pour les groupes d'échantillons I, II, III, IV et VI ; la corrélation n'est pas mauvaise, la valeur du coefficient de corrélation étant 0,994.

Pour tirer certaines conclusions de cette étude comparative, il faut envisager une discussion sur la reproductibilité et la précision de la méthode purement chimique et de la méthode physico-chimique, pour savoir ce que l'on peut espérer attendre d'un résultat. C'est pourquoi, sur deux végétaux que nous possédions en assez grande

quantité, nous avons réalisé des tests de reproductibilité pour la méthode chimique : bombe-turbidimétrie et pour la fluorescence X. Pour cela, nous avons fabriqué 10 pastilles constituées par 1 g de végétal, 1 g de MgO et 1 g de cellulose, sur lesquelles nous avons pointé la raie K_α du soufre et 10 pastilles de 1,4 g environ pour la combustion dans la bombe. Le tableau 5 contient les résultats et nous notons que les valeurs données par fluorescence X ont été lues directement sur la droite d'étalonnage à partir de SO_4Mg.

TABLEAU 5

Reproductibilité des mesures par voie chimique et par fluorescence X, pour deux échantillons de teneurs différentes

Luzerne		Tomate	
Fluorescence X	Bombe et Turbidimétrie	Fluorescence X	Bombe et Turbidimétrie
1,62	1,85	13,82	11,80
1,74	1,77	14,00	11,55
1,66	1,76	13,78	10,10
1,60	1,75	13,86	11,23
1,63	1,86	13,80	11,51
1,66	1,81	13,86	11,26
1,64	2,03	13,92	11,49
1,58	1,74	14,13	13,14
1,56	1,95	13,84	13,20
1,52	1,74	13,65	11,44
Moy. 1,62 °/oo	Moyenne 1,83 °/oo	Moyenne 13,87 °/oo	Moyenne 11,67 °/oo

Nous constatons qu'il n'y a pas bon accord entre les deux méthodes et que le sens de variation n'est pas le même pour les deux végétaux ; leur teneur en soufre étant très différente, nous pouvons penser qu'une même gamme ne convient pas pour déterminer le soufre par fluorescence X.

Un essai de calcul de la précision théorique sur ces deux séries de résultats a conduit aux valeurs inscrites dans le tableau 6 : nous constatons que la fluorescence X donne une meilleure précision que la turbidimétrie. Malheureusement, ces chiffres sont optimistes car ils ne tiennent compte que des erreurs accidentelles et non pas des erreurs systématiques qui doivent intervenir dans ces dosages. En effet, nous avons traité de la même manière un échantillon de teneur forte (supérieure à 10 p. 1 000) et un échantillon de teneur faible (inférieure à 2 p. 1 000) ; or, avec la gamme d'étalonnage utilisée, un comptage de 1 000 impulsions par minute correspond à 0,38 p. 1 000 de soufre environ. L'imprécision conjuguée sur le tracé de la droite et sur la mesure de la raie de l'échantillon de luzerne, peut atteindre près de 1 000 impulsions, ce qui explique la différence de 0,21 p. 1 000 trouvée entre dosage par fluorescence et dosage chimique. Un comptage sur 10 minutes aurait été préférable sur cet échantillon, en nous donnant une valeur proche de 2 p. 1 000, c'est-à-dire plus élevée que celle obtenue par dosage chimique, comme c'est le cas pour l'échan-

tillon de tomate. La précision sur les échantillons de faible teneur dépend donc de la précision avec laquelle on peut définir le point zéro de la gamme et il importe d'adopter un mode de comptage différent selon le niveau de la concentration en soufre.

TABLEAU 6

Précision théorique des mesures par fluorescence X et par turbidimétrie

Bombe et Turbidimétrie		Fluorescence X	
Luzerne	Tomate	Luzerne	Tomate
(%) 1,70	(%) 2,50	(%) 1,20	(%) 0,3

Par contre, pour l'échantillon de tomate, de forte teneur en soufre, la fluorescence X doit permettre d'atteindre une valeur correcte, alors que la combustion dans la bombe peut être incomplète par suite de la trop grande quantité de végétal par rapport au volume d'oxygène disponible.

Dans un prochain travail, nous apporterons quelques précisions sur ces deux méthodes, d'une part en réalisant pour la fluorescence X, deux gammes de domaines différents : 0 à 3 p. 1 000 et 3 à 40 p. 1 000, d'autre part en déterminant la quantité maximale de soufre pouvant être oxydé dans la bombe par le volume d'oxygène disponible, compte tenu de la combustion de la matière végétale.

Nous envisagerons également le dosage d'autres éléments présents dans les végétaux, en particulier le phosphore et le chlore.

CONCLUSION

L'application de la fluorescence X en chimie agricole montre que cette technique, en évitant la calcination de l'échantillon est, de par sa rapidité, intéressante pour le dosage du soufre total dans les végétaux. Dans l'état actuel de la question, les teneurs supérieures à 3 p. 1 000 calculées par rapport à une gamme à base de sulfate de magnésium, s'accordent bien avec le dosage turbidimétrique après oxydation à la bombe.

Pour les teneurs plus faibles, les résultats sont plus incertains ; le problème doit pouvoir être résolu par une légère augmentation de la durée de la mesure.

Reçu pour publication en octobre 1967.

SUMMARY

QUANTITATIVE ANALYSIS OF MINERAL ELEMENTS IN PLANTS. I. — SULPHUR. CHEMICAL (OXYGEN BOMB) AND X-RAY-FLUORESCENCE METHODS OF DETERMINATION

Determination of the sulphur content in plants is somewhat critical owing to the related problems of sample solution and anion SO_4^{--} determination. However, there are apparently two satisfactory methods for achieving this ; the first is an X-ray fluorescence procedure which avoid plant

calcination ; the second by chemical mean is based on oxidation within an oxygen bomb, followed by turbidimetry.

The latter requires great care to conclude successfully oxidation (amount of vegetable matter, volume of O_2, operating time) and especially to measure out the quantity of the SO_4^{--} ion by turbidimetry (size of Cl_2Ba pellets and required time for formation of the suspension).

As regards X-ray fluorescence, an exacting analysis must take into account the exciting or absorbing effects of various constituents which are more or less plentiful in plants. Thus, sulphur radiation may be partly excited by the fluorescence lines of Ca, K and Cl, or absorbed by P and Si, such effects conducing to an positive or negative error. That is the reason why adjunction of a definite amount of magnesia to the plant enables to buffer these inter-elements and to even organic matter absorption for SK_α line. The determination of the sulphur concentration is performed by mean of synthetic SO_4Mg standards containing the same amount of magnesia as the samples. (This is done by comparing the number of pulses recorded for the Kaline of the samples with that recorded for the reference standards).

The results obtained by both methods and concerning a large number of samples, enable to assert that, for amounts higher than 3 parts in 1 000, there is good agreement between the X-ray fluorescence and the turbidimetric method. However, when the amount is less than 3 parts in 1 000, the results given by the former method are less reliable. Yet we believe they can be improved by increasing the time of measurement and by using reference standards of lower concentration.

ZUSAMMENFASSUNG

DOSIERUNGSVERSUCHE DER MINERALISCHEN ELEMENTE IN DEN PFLANZEN

I. — SCHWEFFEL CHEMISCHE DOSIERUNG (SAUERSTOFF-BOMBE) UND DOSIERUNG DURCH FLUORESZENZ X

Die Bestimmung der Schwefelkonzentrationen in Pflanzen bietet zahlreiche Schwierigkeiten, die mit der Lösung der zu untersuchenden Probe und der Bestimmung des Anions zusammenhängen. Es gibt aber zwei zufriedenstel-lende Methoden, um eine Bestimmung durch zuführen. Weil die R. F. A. ein Kalzienieren der Pflanze vermeidet bringt sie viele Vorteile mit such währen die chemische Methode die auf einer Oxydation mittels einer O_2-bombe mit nach folgen der Trübungsmessung beruht auch befriedigende Ergbnisse zu geben scheint. Diese letze Methode mussvorsichtig angewandt werden um die Oxydation (Pflanzenmenge verbrauchtes O_2-Volumen Dauer des Verfahrens) und besonders die Dosierung des SO_4^{--} Ions mittels Trübungsmiessung (Grösse der $BaCl_2$ — Körner und die benötigte Zeit für die Bildung der Suspension) erfolgreich durchzuführen.

Was die Fluoreszenz anbetrifft so müssen die ausstrahlenden oder absorbierenden Wirkungen gewisser Stoffe die in veränderlichen Verhältnissen in den Pflanzen vorhanden sind für eine strenge Analyse in Betracht gezogen werden. So kann die Schwefelstrahlungsintensität einerseits durch die Fluoreszenzstrahlungen von Ca, K und Cl teilweise angeregt anderseits durch P und Si absorbiert werden. Diese Tatsache führt offenbar zu dem Irrtum dass entweder ein Über- oder- Unterschuss effekt vorliegt. Ein zusatz Menge Magnesia kann diesen Matrix effek zwischenden Elementen puffern und die Absorption der organischen Stoffe für die SK_α Linie nivellieren. Die Bestimmung der Schwefelkonzentrationen erfolgt demgemäss mittels des $MgSO_4$ der Standards die dieselbe Menge an Magnesia woie die Proben enthalten.

Wir veigleichen die Impulszahl der K_α -Linie der Pflanze mit der für die Standards.

Die an Hand zahlreicher Stichproben durch die zwei Methoden erzielten Ergebnisse erlauben es festzustellen dass für einer Gehalt. Über 3 p. 1 000 die Übereinstimmung zwischen Fluoreszenz und Trübungsmessung beftriedigend ist. Für einen Gehalt niedriger als 3 p. 000 sind die durch Fluoreszenz. Analysen erhaltenen Werte zweifelhafter.

Es ist jedoch zu vermuten, dass eine Verbeisserung der Methode durch eine längere Messzeit und durch die Standards mit schwächerer Konzentrationen möglich sein wird.

РЕЗЮМЕ

Опыт дозажа минеральных элементов в растениях.

1. Сера. Химический дозаж. (Кислородная бомба и дозаж при помощи флуоресценции X).

Н. СУТИ, Р. ГЕННЕЛОН.

Дозаж серы в растениях представляет известные трудности, связанные с приготовлением пробы и дозажем аниона; флуоресценция X, при которой избегается озоление растения, представляет многие преимущества, так-же как и химический метод основанный на окислении в кислородной бомбе с последующей турбидиметрией и могущий тоже дать удовлетворительные результаты. Этот последний метод требует принятия некоторых мер предосторожности для благополучного проведения окисления (количество растительного материала, об'ем необходимого O_2, длительность действия), и особенно дозажа иона SO_4 при помощи турбидиметрии (размеры гранул $Ba\,Cl_2$; время необходимое для образования суспензии).

В отношении флуоресценции X, строгий анализ должен принять во внимание эффекты возбуждения или поглощения некоторых элементов, находящихся в различных пропорциях в растении. Так например, излучение серы может, с одной стороны возбуждаться частично полосами флуоресценции Ca, K и Cl, а с другой — поглощаться фосфором и кремнием; эффекты эти могут привести к ошибке при избытке, или недостатке. Поэтому, предоставление в распоряжение растения определенного количества магнезия, вызывает буферный эффект между элементами и нивелирует поглощение органического вещества полосой $SK\alpha$. Определение концентраций серы производится в этом случае с помощью сернокислого марганца и синтетических стандартов содержащих те-же количества этого элемента, что и растения. (Авторы сравнивают количество импульсов зарегистрированных на полосе $K\alpha$ для растения, с количеством импульсов зарегистрированных для стандартов).

Результаты применения обоих методов на многочисленных пробах позволяют заключить что для содержаний превышающих 3 °/₀₀ соответствие между флуоресценцией X и турбидиметрией — удовлетворительно; для содержаний не превышающих 3 °/₀₀ указания дающиеся флуоресценцией более неопределенны, но авторы выражают надежду со временем их улучшить при помощи продления времени измерения и реализации стандартов более низких концентраций.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALICINO J. F., 1958. The determination of sulfur in organic compounds. *Microchim. J.*, II 83-90.

ALICINO J. F., 1941. Microanalytical determination of sulfur. A modified bomb method. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, **13**, 506.

BLANC P., BERTRAND P., LIANDIER L., 1955. Semi-microméthode de dosage des sulfates. *Chim. anal.* **37**, 305-307.

BLANCHAR R. W., REHM G., CALDWELL A. C., 1965. Sulfur in plant materials by digestion with nitric and perchloric acid. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 29, 71-72.

BURRIEL F., GIMENEZ GOMEZ, 1955. Sur le dosage colorimétrique du soufre libre. *Mikrochim. Acta. Autr*, nº 4, 839-44.

BUTTERS B., CHENERY EM., 1959. A rapid method for the determination of total sulphur in soils and plants. *Analyst*, vol. 84, nº 997, 239-245.

FLECK A., HILL D. W., 1933. The micro-estimation of sulfur and phosphorus in organic compounds. *J. amer. chem. Soc.*, **55**, 3479.

FRITZ James S., YAMANURA Stanley S., 1955. Rapid microtitration of sulfate. *Anal. Chem.*, vol. 27, nº 9.

GARRIDO Lachica., 1964. Determination of sulphur in plant material. *Analyst*, vol. 89, 61-66.

GUENNELON R., 1966. Determination du soufre dans les végétaux par spectrométrie X (à paraître).

HALLETT L. T., and KNIPERS J. W., 1940 Microdetermination of sulfur in organic compounds. *Ind. Eng. Chem.* Analytical Edition (12), nº 6, p. 357-359.

HAWK P. B., BERGEIMO., 1931. *Pratical physiological chemistry*. 10th ed. Blakistan Philadelphia, p. 872.

HOREEISCHYS K., BUHLER F., 1947. Mikromethode zur quantitativen Bestimmung organisch gebundenen Schwefels. *Mikrochem. Mikrochim. Acta. Österr.*, **33**, nº 2-3, 231-43.

KROBER Orland A., HOWELL Robert W., 1958. Determination of sulfur in plant materials. *J. Agric. Food. Chem.*, vol. 6, nº 8, 591-592.

KUCK J. A. and GRIFFEL M. 1940 A furnace for micro-carius determination — *Ind. Eng. Chem.* — Analytical Edition (12), nº 2, p. 125-126.

LYSYJ IHOR., ZAREMBO John E., 1958. Rapid quantitative determination of sulfur in organic compounds. *Anal. Chem.*, vol. 30, nº 3, 428-430.

LYSYJ IHOR., ZAREMBO John E., 1959. Spectrophotometric method for the determination of small amounts of sulfur in organic compounds. *Microchem. J.*, vol. III, 173-180.

MAZOYER R., 1966. Communication privée.

MILLET R., 1963. Analyse du Soufre dans les engrais. *Chim. anal.*, vol. 45, p. 174-185.

MITCHAM D., PICCOLO B., TRIPP V. W., O'CONNOR Robert T. X-ray fluorescence in cotton modification research. *Advances in X-ray analysis*, vol. 8, 456-461.

RICHARD M., 1967 Communication privée.

SCHNÖNIGER W., 1955. Eine mikro analytische Schnellbestimmung von Halogen in organischen Substanzen. *Mikrochim. Acta*, **1**, 123-129.

SINGER E., 1961. Turbidimetric estimation of sulphates. *Chem. Prümyse*, **11** (10), 526.

SNELL SNELL., 1959. *Colorimetric methods of analysis*, vol. II, p. 767-789.

STEYERMARK A,., 1951. *Quantitative organic micro analysis*. Blakistan New York, p. 156.

STEYERMARK A., BASS E., LITTMAN B. 1948. Microdetermination of sulfur in organic componds. *Anal. Chem.* (20) 1948 — nº 6. — p. 587.

VINCENT, SARAZIN, HERVIAUX., 1936. Le Soufre dans l'agriculture bretonne. *Ann. agron.*, p. 20-40.

WAGNER E. C., MILES S. H., 1947. Volumetric semi-micro-determination of sulfur in organic compounds by use of the oxygen bomb. *Anal. Chem.*, **19**, 274-277.

ZIMMERMAN W., 1947. Zur mikro mass analytischen Bestimmung des Schwefels in organischen und anorganischen Substanzen. *Mikrochem. Mikrochim. Acta. Österr.*, **33**, nº 2-3, 122-30.

Ann. agron., 1967, **18** (6), 669-674.

CHRONIQUE DES LIVRES

SALTER P. J. and GOODE J. E. — CROP RESPONSES TO WATER AT DIFFERENT STAGES OF GROWTH. — Research review nº 2. Farnham Royal, Commonwealth agricultural Bureaux 1967, 246 p.

Le but de ce livre est d'examiner les seuils critiques pour l'eau de diverses plantes de grande culture, horticoles et sylvicoles à différents stades de leur croissance. Une telle étude est essentielle pour comprendre les réponses des cultures à divers taux d'irrigation et ce livre intéressera autant les physiologistes que les agronomes ou les horticulteurs.

En 1962, le professeur BALCHIN commentant dans *Nature* le rapport d'un comité technique de ressources naturelles, concluait que « l'application scientifique de l'eau dans la plupart des terres basses d'Angleterre constituerait une petite révolution agricole en accroissant les rendements et en renforçant considérablement notre position économique ». Si telle est la position en Angleterre, on conçoit que l'utilisation rationnelle de l'eau dans les régions du globe, arides, semi-arides ou subhumides soit primordiale.

Dernièrement, de fortes sommes furent dépensées et le seront encore pour irriguer des zones qui seront ainsi mises en valeur et accroîtront le niveau de vie de leurs habitants.

J. L.

SOIL-MOISTURE AND IRRIGATION STUDIES. PROCEEDINGS OF A PANEL ON THE USE OF ISOTOPES AND RADIATION TECHNIQUES IN SOIL-MOISTURE AND IRRIGATION STUDIES, ORGANIZED BY THE JOINT F. A. O.-I. A. E. A. DIVISION OF ATOMIC ENERGY IN FOOD AND AGRICULTURE AND HELD IN VIENNA, 14-18 MARS 1966. — Vienna, International Atomic Energy Agency, 1967, 109 p.

Cet ouvrage publie les comptes rendus de la réunion organisée à Vienne, en mars 1966, par l'*International Atomic Energy Agency* et la F. A. O. sur l'emploi des isotopes et des radiations dans les recherches sur l'eau du sol et l'irrigation.

Il contient les articles suivants :

FRIED M., and BARRADA Y. — La nécessité, pour les régions arides et semi-arides, des études sur l'utilisation efficace de l'eau (anglais).

MOERMAN P., DE BOODT M. et MORTIER P. — Résolution spatiale de la sonde à neutrons (anglais).

DAMAGNEZ J. — Problèmes d'étalonnage de la sonde à neutrons : applications à la détermination de l'évapotranspiration réelle des cultures (français).

KÜHN W. — Principales considérations et facteurs limites concernant l'utilisation d'équipement de profondeur et de surface pour mesurer la densité du sol à l'aide des rayonnements gamma (anglais).

GARDNER W. R. — Techniques d'étalonnages des rayons bêta pour mesurer le changement dans la teneur en eau des feuilles et le taux d'humidité des plantes (anglais).

BOOHER L. J. — Perspective de développement de l'appareillage des isotopes et des radiations pour une utilisation plus efficace dans la production des cultures agricoles (anglais).

NIELSEN D. R., and BIGGAR J. W. — Radio-isotopes et sels marqués dans le déplacement de l'eau (anglais).

WIERSUM L. K. — Développement du système radiculaire (anglais).

GARDNER W. R. — Connaissance actuelle et interrelation entre l'humidité du sol, l'irrigation, le drainage et l'utilisation efficace de l'eau (anglais).

X. — Programme de recherches coordonnées pour l'application des techniques de radiation, dans l'étude de l'utilisatlon efficace de l'eau (anglais).

ISOTOPES IN PLANT NUTRITION AND PHYSIOLOGY. — PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM ON THE USE OF ISOTOPES IN PLANT NUTRITION AND PHYSIOLOGY JOINTLY ORGANIZED BY THE INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY AND THE FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, AND HELD IN VIENNA, 5-9 SEPTEMBRE 1966. — Vienne, International Atomic Energy Agency, 1967, 596 p.

Cet ouvrage renferme les comptes rendus du Symposium organisé à Vienne en septembre 1966, sur l'utilisation des isotopes dans les recherches sur la nutrition des plantes et la physiologie végétale, par l'*International Atomic Energy Agency* et la F. A. O.

Il contient 45 articles répartis dans les sections suivantes : Chimie et fertilité du sol ; Techniques expérimentales ; Assimilation et métabolisme ; Phénomènes de transport ; Absorption, accumulation et transport des ions ; Aspects génétiques de la nutrition des plantes ; Séminaire sur l'étude de la nature, la génétique et la sélection de génotypes et de mutants adaptés aux facteurs nutritionnels chez les plantes supérieures.

MISES AU POINT DE CHIMIE ANALYTIQUE, ORGANIQUE, PHARMACEUTIQUE ET BROMATOLOGIQUE PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE J.-A. GAUTIER ET P. MALANGEAU. — Paris, Masson, 1967, 222 p.

Cet ouvrage, seizième de la série, comprend six articles :

BARTOS J. — Le dichroïsme circulaire selon VELLUZ et LEGRAND : Principe et applications.

BLANQUET P. et COMAR D. — L'analyse par activation : ses applications biologiques.

NAVELLIER P. — Aspect actuel de la réglementation et de l'analyse du café.

PITET G. — La spectrophotofluorimétrie : applications à l'analyse fonctionnelle et au contrôle des produits pharmaceutiques.

URION E. — Analyse des bières : la densité, base de contrôle de la fabrication.

WOLFF J.-P. — Données actuelles sur la composition des insaponifiables.

PAULI F. W. — SOIL FERTILITY. A BIODYNAMICAL APPROACH. — London, Adam-Hilger, 1967, 204 p.

Rassemblant les recherches dans différents domaines scientifiques, le docteur PAULI préconise une nouvelle étude plus fondamentale de la fertilité du sol, qui pourra, espère-t-il, aider à faire le meilleur emploi possible des ressources agricoles disponibles, et à développer les sols vierges pour la production agricole.

L'ouvrage comprend les chapitres suivants : la place du sol dans la nature ; la dynamique de la formation du sol ; les bases de la fertilité ; l'humus et la fertilité des sols ; l'exploitation par l'homme de la biodynamique du sol.

Il est utilement complété par un glossaire, une bibliographie et un index.

Présenté comme un pas vers la solution du problème mondial de l'alimentation, cet ouvrage sera particulièrement utile dans les pays où le problème se pose d'une manière aiguë.

TRASPORTO DELLE MOLECOLE ORGANICHE NELLE PIANTE. ATTI DEL VIe SIMPOSIO INTERNAZIONALE, DI AGROCHIMICA, VARENNA, 5-10 SEPTEMBRE 1966. — Pisa, Istituto di Chimica agraria. Coll. Riv. *Agrochimica* n° 10, 1967, 461 p.

Cet ouvrage donne les comptes rendus du VIe Symposium international d'Agrochimie consacré au transport des molécules organiques dans les plantes. Les six sessions ont été consacrées aux sujets suivants :

Transfert des molécules organiques principales : protides, lipides, glucides,
— absorption et transport des insecticides,
— absorption et transport des fongicides, absorption et transport des herbicides et des hormones végétales,
— interaction entre molécules organiques et inorganiques dans les plantes,
— mouvement des nucléoprotéines virales.

SELECTED PAPERS IN SOIL FORMATION AND CLASSIFICATION. — Madison, Soil Science Society of America, S. S. S. A. special publication, n° 1, 1967, 428 p.

Cet ouvrage réunit un choix des meilleures publications de la *Soil Science Society of America* dans le domaine de la formation et de la classification des sols. Récemment, des progrès considérables ont été faits dans la reconnaissance de groupes génétiques de sols et dans la compréhension des mécanismes intervenant dans la formation et la classification des sols. Ce volume n'a pas la prétention de présenter une analyse intégrale de la recherche récente, mais devrait permettre d'aider les étudiants en science du sol qui n'ont pu se procurer ces travaux originaux lors de leur première parution.

Les articles composant cet ouvrage ont été groupés en 5 chapitres dont les titres sont les suivants :

— Introduction : formation des sols en relation avec les facteurs environnants,
— caractéristiques de quelques groupes génétiques de sols,
— facteurs de formations des sols — concepts et interprétations,
— genèse des sols — mécanismes et changements,
— quelques concepts de classification des sols.

J. L.

SOIL TESTING AND PLANT ANALYSIS. — Part I : Soil testing. Part II : Plant analysis. Madison, Soil Science Society of America, S. S. S. A. special publication n° 2, 1967, 157 et 114 p.

Cet ouvrage publie les comptes rendus de deux symposia tenus conjointement par la *Soil Science Society of America*, la *Crop Science Society of America* et l'*American Society of Agronomy*.

Le premier symposium qui s'est déroulé à Kansas City du 15 au 19 novembre 1964 a consacré ses séances au problème de l'analyse des sols.

Les communications ont été les suivantes :

TISDALE S. L. — Problèmes et difficultés de l'analyse des sols.

MELSTED S. W. — Philosophie de l'analyse des sols.

PECH T. R. et MELSTED S. W. — Échantillonnage pour l'analyse des sols.

THOMAS G. W. — Problèmes rencontrés dans les méthodes d'analyse des sols.

VIETS F. G., Jr. — Analyse des sols pour les cations oligo-éléments.

REISENAUER H. M. — Assimilabilité des anions secondaires et oligo-éléments.

HANWAY J. J. — Expériences au champ pour des corrélations d'analyse et de granulométrie des sols.

ROUSE R. D. — Organisation d'une analyse granulométrique.

BARBER S. A. — Changement dans la philosophie des interprétations de l'analyse des sols.

FLANNERY R. L. et STECKEL J. E. — Détermination simultanée par auto-analyse du calcium, du potassium, du magnésium et du phosphore dans des électrodialysats de sol.

SHICKLUNA J. C. et WALSH L. M. — Application d'un matériel électronique à l'analyse des sols.

Un second symposium tenu à Columbus du 31 octobre au 5 novembre 1965 a été consacré à l'analyse des plantes et des tissus. Les communications ont été les suivantes :

ALDRICH S. R. — Analyse des plantes : Problèmes et difficultés.

ULRICH A. et HILLS F. J. — Principes et pratiques de l'analyse des plantes.

MAC KENZIE A. J. — L'analyse des plantes aidant la fertilisation du coton.

FRAZIER R. D., SMALL H. G. et OHLROGE A. J. — Concentrations en éléments nutritifs dans des parcelles provenant de champs de soja.

JONES J. B. Jr. — Interprétation de l'analyse des plantes pour diverses récoltes indistrielles.

KENWORTHY A. L. — Analyse des plantes et son interprétation pour diverses plantes horticoles.

CHAPMAN H. D. — Analyse des plantes, reflet de l'état nutritionnel de quelques récoltes.

KUBOTA J. et LAZAR V. A. — Analyse spectrographique aux rayons X de plantes fourragères communes.

WICKSTROM G. A. — Analyse des tissus végétaux dans les essais au champ.

Glossaire : Noms communs et scientifiques des plantes citées dans cet ouvrage.

PEARSON R. W., and ADAMS F. ed. — SOIL ACIDITY AND LIMING. — Madison, American Society of Agronomy, *Agronomy* n° 12, 1967, 274 p.

Cette douzième monographie de l'*American Society of America* est consacrée au problème des sols acides et de leur amélioration par chaulage.

Le but recherché par les éditeurs et auteurs de cet ouvrage est d'expliquer les réponses de certaines plantes cultivées aux amendements calcaires sur les sols divers, et sous les climats différents rencontrés aux États-Unis. Les chapitres de ce livre sont les suivants :

COLEMAN N. T., THOMAS G. W. — Chimie de l'acidité du sol.

JACKSON W. A. — Effets physiologiques de l'acidité du sol.

BARBER S. A. — Nature des amendements calcaires et leur utilisation.

ADAMS F., PEARSON R. W. — Réponse des plantes cultivées aux amendements calcaires dans le sud des États-Unis et à Porto-Rico.

WOODRUFF C. M. — Réponse des plantes cultivées aux amendements calcaires dans le Centre ouest des États-Unis.

WEEKS M.E., LATHWELL D. J. — Réponse des plantes cultivées aux amendements calcaires dans le nord-est des États-Unis.

JACKSON T. L., KNOX E. G., HALVORSON A. R., BAKER A. S. — Réponse des plantes cultivées aux amendements calcaires dans l'ouest des États-Unis.

AT DE SAINT-FOULC J. d'. — IRRIGATION PAR ASPERSION. — Paris, Eyrolles, 1967, 232 p.

L'irrigation en pluie reproduisant artificiellement un phénomène naturel permet d'irriguer à peu près n'importe quel sol, quels que soient son relief et sa nature.

Cette récente méthode d'irrigation connaît, en France, un développement spectaculaire, qui devrait aller en s'accélérant avec la mise en service par l'État de grands réseaux d'irrigation collectifs (Bas-Rhône Languedoc, Provence, coteaux de Gascogne).

Mais irriguer par aspersion est une opération coûteuse. Le calcul des réseaux collectifs et industriels doit donc être fait avec le plus grand soin.

C'est dans ce but qu'a été rédigé cet ouvrage essentiellement pratique. Il s'adresse à la fois au technicien de l'irrigation et à l'utilisateur.

Dans une première partie, l'auteur rappelle les mécanismes des rapports existant entre la plante, le sol et l'eau. Les besoins des plantes et les possibilités de retenue d'eau par le sol sont tout particulièrement analysés.

La deuxième partie est plus spécialement consacrée aux calculs de base, et, notamment, à l'évapotranspiration des plantes, ainsi qu'aux doses et aux fréquences d'arrosage.

Dans une troisième partie, après avoir examiné les réserves d'eau naturelles et artificielles et les modes de puisage, l'auteur consacre un chapitre au calcul du dimensionnement des pompes, des tuyauteries et des arroseurs.

Les différents matériels actuels sont ensuite décrits, et les méthodes d'arrosage sont analysées une à une.

La protection des végétaux contre le gel par l'aspersion ainsi que les irrigations fertilisantes font l'objet d'études particulières.

Enfin, dans une quatrième partie, l'auteur traite de l'aspect économique des installations, de leur coût et de leur rentabilité.

L'ouvrage est complété par un examen des diverses possibilités d'intervention de l'État en cette matière.

Cet ouvrage, qui traite des réseaux individuels, constitue un excellent outil pour tous ceux qui ont la charge de concevoir, de promouvoir et de vulgariser cette méthode nouvelle d'irrigation.

RUELLAN F. — PHOTOGRAMMÉTRIE ET INTERPRÉTATION DE PHOTOGRAPHIES STÉRÉOSCOPIQUES TERRESTRES ET AÉRIENNES. — Fascicule I : Initiation. Paris, Masson et Cie, 1967, 124 p.

L'important ouvrage dont le premier fascicule est présenté traite d'une discipline de recherche scientifique et d'enseignement, aux nombreuses applications dans les sciences de la Terre, les sciences naturelles, l'agronomie, les travaux publies, l'urbanisme et l'archéologie, les sciences médicales et chirurgicales, etc. L'ouvrage est divisé en quatre fascicules où sont constamment unis les méthodes de la photogrammétrie et de l'interprétation, les définitions précises et les travaux pratiques, appuyés sur une abondante bibliographie.

Le premier fascicule est consacré à l'Initiation. Il présente d'abord « un Avant-Propos » qui esquisse les progrès de la photogrammétrie et de l'interprétation des photographies aériennes, tels que l'auteur les a connus depuis la guerre de 1914-18. Il y est également question des expériences qu'il a faites dans son enseignement au Brésil et en France, et pendant ses voyages. L'élaboration

de la carte à 10 000 du Golfe Normand-Breton est ensuite exposée brièvement ainsi que les idées de l'auteur concernant la formation des interprétateurs.

L' « Introduction » qui suit rappelle les grandes étapes de la photogrammétrie et de l'interprétation des photographies terrestres et aériennes, puis elle traite des rapports entre l'interprétation et les mesures, des déformations perspectives des objets, de l'étude du faisceau lumineux dans les chambres métriques et des problèmes de l'échelle.

Après ces notions indispensables sont abordés les travaux pratiques en commençant par les instructions pour les calques d'interprétation et pour les analyses des faits observés. Un modèle de feuille d'interprétation et le programme du « Brevet d'interprétateur de photographies aériennes » de l'Université de Rennes terminent l'exposé didactique du premier fascicule.

Un lexique donne ensuite la définition de tous les termes techniques employés dans ce premier volume (il sera complété dans les trois autres parties). La bibliographie couvre l'histoire des recherches, indique les ouvrages généraux et les publications qui se rapportent aux divers chapitres y compris les travaux pratiques et l'enseignement. La liste alphabétique des auteurs cités dans le premier fascicule permet une consultation facile de l'ouvrage et de sa bibliographie.

Après les tables, une pochette contient huit exemples d'interprétation de photographies aériennes stéréoscopiques disposées en triplets avec les légendes des symboles et des signes qui permettent de lire les croquis de localisation, les schémas d'interprétation et le commentaire de chaque groupe de photographies.

(Analyse de l'Éditeur)

SYMPOSIUM ON METHODS IN SOIL BIOLOGY. — Bucarest, December 1965. Rumanian National Society of Soil Science, Bucarest, 1967, 189 p.

Ce symposium contient les travaux suivants :

— Considérations sur l'analyse microbiologique employée dans l'appréciation de l'état de fertilité du sol.

— Observations statistiques sur l'influence des techniques culturales sur l'activité microbienne du sol.

— Détermination des erreurs absolues dans l'analyse quantitative de la microflore du sol.

— Valeur des extraits de sol, comme milieu écologique de culture.

— Recherche préliminaire sur les protozoaires de la rhizosphère et du sol.

— Problèmes actuels de la classification bactérienne.

— Remarques sur quelques tests utilisés dans la détermination habituelle de lignées bactériennes.

— Méthodes d'observation des colonies en lumière directe et indirecte.

— Immuno-électrophorèse des antigènes nucléo-protéiques de différentes espèces du genre *Corynebacterium*.

— Méthodes pour l'étude des algues du sol.

— Quelques problèmes méthodologiques de l'activité enzymatique dans le sol.

— Activité de la levanase dans le sol.

— Méthodes de détermination de l'activité de la phosphatase dans le sol.

— Contribution à la méthode de détermination de l'azote fixé et de la capacité d'ammonification du sol.

— Méthodes employées dans les recherches microbiologiques dans la rhizosphère des plantes.

— Méthodes de recherche sur les interrelations des microorganismes du sol.

— Utilisation des bactériophages dans la recherche de la résistance du sol aux bactéries phytopathogènes.

— Dégradation des herbicides dans le sol.

Ann. agron., 1967, **18** (6), 675-678.

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1967

R. Blanchet, M. Bosc. — Bilans de potassium et alimentation potassique des plantes en présence de rétrogradations et de libération d'ions K^+ non échangeables 601

A. Blot, G. Pédro. — Étude des relations entre la composition granulométrique et la constitution minéralogique des sols et horizons d'altération. 203

P. Chartier. — Lumière, eau et production de matière sèche du couvert végétal 301

J. Chrétien. — Étude des concrétions et matériaux ferrugineux en sol rouge sous climat tempéré..... 339

J. Concaret. — Étude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact de solutions aqueuses. Première partie..... 65

Deuxième partie 99

M. Coppenet A. Rampon. — Contribution à l'étude des sols granitiques et schisteux de Bretagne. Le Bassin versant du Blavet..... 455

C. Courpron. — Détermination des constantes de stabilité des complexes organo-métalliques des sols..... 623

A. Dartigues, E. Lubet. — Relation entre le pH du sol et la manifestation de la carence en zinc du maïs dans un secteur du bassin de l'Adour ; possibilités et limites d'un diagnostic par l'analyse du sol..... 285

J. Dejou. — L'altération des granites à 2 micas du massif de la Pierre-qui-Vire. Deuxième partie 145

J. Delas. — Liaisons entre cuivre et matière organique dans un podzol développé sur sable des Landes et accidentellement enrichi en cuivre.. 17

A. Féodoroff, B. Yaron. — Expériences sur l'infiltration de l'eau non saturante dans un sol préalablement humide..... 5

A. Fréjat, A. Anstett, F. Lemaire. — Capacité d'échange de cations des systèmes radiculaires et des sols, et leurs relations avec l'alimentation minérale..... 31

J.-R. Hennequin, C. Juste. — Présence d'acides phénols libres dans le sol. Étude de leur influence sur la germination et la croissance des végétaux. 545

C. Juste, J. Delas. — Influence de l'addition d'aluminium, de fer, de calcium de magnésium ou de cuivre sur la mobilité électrophorétique, le spectre d'absorption infrarouge et la solubilité d'un composé humique..... 403

J.-M. Lefebvre, Élisabeth Joliet. — Étude des variations de la composition protidique et glucidique des parties aériennes du Dactyle. Première partie 529

Suzanne Mériaux. — Signification physiologique de la pression de succion des feuilles en relation avec l'écologie de la plante..... 639

J. Morizet. — Étude de la circulation de l'eau non saturante dans différentes terres en régime de dessèchement..... 267

Simone PÉRIGAUD. — Effet du manque d'oxygène et de l'excès d'eau au niveau des racines sur la croissance et la nutrition globale de la plante.. 485

M. ROBELIN. — Action et arrière-action de la sécheresse sur la croissance et la production du Tournesol 579

W. ROUTCHENKO. — Appréciation des conditions de la nutrition minérale des plantes basée sur l'analyse des sucs extraits des tissus conducteurs.... 361

Ginette SIMON-SYLVESTRE. — Premiers résultats d'une étude sur les effets de la désinfection des sols par la vapeur..... 243

Nicole SOUTY, R. GUENNELON. — Essai de dosage des éléments minéraux dans les végétaux. I. — Soufre. Dosage chimique (bombe à oxygène) et dosage par fluorescence X..... 653

M. VILAIN, J.-P. DRUELLE. — Extraction de petits échantillons de gaz du sol. Dosage par chromatographie..... 507

Mises au point bibliographiques.

R. CALVET. — La diffusion dans les systèmes argile-eau. I. — Rappels théoriques concernant les phénomènes de diffusion II. — Diffusion des cations 217, 924

Chronique des livres..... 91, 445, 571, 669

CONTENTS

R. BLANCHET M. BOSC. — Potassium balance and potassic nutrition of plants when being subjected to fixation and release of non-exchangeable K^+ ions 601

A. BLOT, G. PÉDRO. — Investigation of the relationship between the size distribution and the mineralogical composition of soils and weathered horizons. 203

P. CHARTIER. — Light, water and dry matter production of a plant cover. 301

J. CHRÉTIEN. — Investigation, in temperate climate, of concretions and ferruginous materials in red soils..... 339

J. CONCARET. — Mechanism of the destruction of soil aggregates in contact with aqueous solutions. First part..... 65

Second part 99

M. COPPENET, A. RAMPON. — Contribution to the survey of the granite and schistose soils of Brittany. The Blavet Catchment basin..... 455

C. COURPRON. — Determination of the constants of stability of organo-metallic complexes of soils..... 623

A. DARTIGUES, E. LUBET. — Relationship between soil pH and evidence of zinc deficiency in maize grown in the catchment area of the river Adour. 285

J. DEJOU. — Weathering of two-micas granites in the massif of *La-Pierre-qui-Vire*. Second part..... 145

J. DELAS. — Bonds between copper and organic matter in a podzol developed on sand of the Landes and accidentally enriched in copper..... 17

A. FÉODOROFF, B. YARON. — Experiments on non-saturating-water seepage in an already wetted soil..... 5

A. Fréjat, A. Anstett, F. Lemaire. — Cation-exchange capacity of root systems and soils, and relationship with mineral feeding of plants.... 31
J.-R. Hennequin, C. Juste. — Presence of free phenolic acids in the soil. Investigation of their effects on germination and growth of plants.... 545
C. Juste, J. Delas. — Influence of the addition of aluminium, iron, calcium, magnesium or copper on the electrophoretic mobility, the infra-red spectrum and solubility of a humic component..... 403
J.-M. Lefebvre, Élisabeth Joliet. — Study of variations of the protein and glucide composition of the above-ground portion of *Dactylis* (First report) 529
Suzanne Mériaux. — Physiological meaning of the suction tension of leaves with respect to the ecology of the plant..... 639
J. Morizet. — Investigation on the circulation of non-saturating water in soils which are drying up..... 267
Simone Périgaud. — Effects of oxygen deficiency and water excess on the growth and mineral nutrition of plants..... 485
M. Robelin. — Effects and after-effects of drought on the growth and yield of Sunflower 579
W. Routchenko. — Evaluation of the mineral nutrition of plants based on the analysis of the juices extracted from conductive tissues..... 361
Ginette Simon-Sylvestre. — Initial results of a survey on the effects of steam treatments of soils..... 243
Nicole Souty, R. Guennelon. — Quantitative analysis of mineral elements in plants. I. — Sulphur. Chemical (Oxygen bomb) and X-ray-fluorescence methods of determination..... 653
M. Vilain, J.-P. Druelle. — Micro-sampling of gases in the soil..... 507

Reviews.

R. Calvet. — Diffusion in clay-water systems. I. — Review of theoretical notions concerning the processes of diffusion..... 217
II. — Cation diffusion .. 429

Book reviews 91, 445, 571, 669